Aus der Poliklinik und Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten der Freien Universität Berlin
Direktor: Professor Dr. med., Dr. med. dent. Ewald Harndt
und aus der Forschungsstelle für Mikromorphologie im Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Bln.-Dahlem
Komm. Leiter: Prof. Dr. phil. habil. Johann-Gerhard Helmcke

Elektronenmikroskopische Untersuchungen über die Histologie des normalen Zementes der Wurzeln menschlicher Zähne

INAUGURAL-DISSERTATION
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
an der
Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Hans Christian Herting
aus Mühlhausen i. Thür.

1962

Aus der Poliklinik und Klinik für Zahn-, Mund- und
Kieferkrankheiten der Freien Universität Berlin
Direktor: Prof. Dr. med., Dr. med. dent. Ewald Harndt

und aus der Forschungsstelle für Mikromorphologie im Fritz-
Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin-Dahlem
Komm. Leiter: Prof. Dr. phil. habil. Johann-Gerhard Helmcke

Elektronenmikroskopische Untersuchungen über die Histologie des normalen Zementes der Wurzeln menschlicher Zähne

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
an der
Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Hans Christian Herting
aus Mühlhausen i. Thür.

Dekan: Prof. Dr. med., Dr. med. dent. Ewald Harndt

Referent: Prof. Dr. med., Dr. med. dent. Ewald Harndt

Korreferent: Prof. Dr. med. Willy Schwarz

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Freien Universität Berlin

Promoviert am: 7. Mai 1962

Meinen lieben Eltern

gewidmet

Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. Einleitung	7
B. Literaturübersicht	8
C. Material und Methode	19
I. Material	19
II. Methode	19
1. Das Ultradünnschnittverfahren	19
2. Das Oberflächenabdruckverfahren	22
3. Die Röntgenfeinstrukturanalyse	25
D. Ergebnisse	26
I. Die allgemeine Mikromorphologie des Zementes	26
II. Die spezielle Mikromorphologie des Zementes	28
III. Das Zement und die angrenzenden Gewebe	3o
IV. Ergebnisse der Oberflächenabdruckuntersuchungen	31
Abbildungen	32
E. Diskussion	68
F. Zusammenfassung	73
G. Literaturverzeichnis	77

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546822_0055

A. Einleitung

Alle der Lichtmikroskopie zugehörigen Verfahren können dem Auflösungsvermögen entsprechend nur diejenigen Gewebsstrukturen direkt sichtbar machen, deren Größe o,1-o,2 µ (1ooo - 2ooo ÅE) oder mehr beträgt; alle kleineren Strukturen resp. Strukturelemente bleiben unsichtbar. Diese der Histologie bisher gesetzte Grenze wird mit den Mitteln der Elektronenmikroskopie weit unterschritten; das im Vergleich zur Lichtmikroskopie 5o-1oomal größere Auflösungsvermögen erlaubt es, die Strukturen bis zu einer Größenordnung von o,oo2 µ (2o ÅE) zu erfassen.

Im Gegensatz zu Dentin und Schmelz ist das Wurzelzement menschlicher Zähne ebenso wie die anderen Teile des Parodontiums - mit Ausnahme der Gingiva propria marginalis - bisher noch nicht elektronenmikroskopisch untersucht worden, wenn man von wenigen nicht näher interpretierten Abbildungen und einzelnen verstreuten Mitteilungen absieht. Deshalb soll unter Anwendung der Elektronenmikroskopie der sublichtmikroskopische Bereich des Zementgewebes systematisch untersucht und jene morphologischen Feinheiten sichtbar gemacht werden, die mit den bisher zur Verfügung stehenden Methoden nicht erkannt werden konnten.

Mit der genaueren mikromorphologischen Darstellung soll ein allgemeiner Überblick über den grundsätzlichen normal-histologischen Aufbau des Zementes gegeben werden.

B. Literaturübersicht

Seit der ersten lichtmikroskopischen Darstellung des Zahnwurzelzementes des Menschen durch die PURKINJE-Schüler FRAENKEL und RASCHKOW im Jahre 1835 und durch RETZIUS im Jahre 1836 (DENTON (54)) ist die Histologie der "dritten Zahnhartsubstanz" Gegenstand vieler Untersuchungen gewesen.

Vom Aufbau des Zementes bestehen heute - in Zusammenfassung der in der wichtigsten älteren und neueren Literatur (1-38, 46-48) bekanntgewordenen Ergebnisse - folgende allgemeine Vorstellungen:

Das Zementgewebe ist mesenchymaler Herkunft und besteht in vollausgereiftem Zustand zunächst aus der Grundsubstanz (oder Matrix), die sich aus der homogenen Kittsubstanz und Fibrillen zusammensetzt, ferner aus den in die Grundsubstanz eingebetteten SHARPEYschen Fasern des Periodontiums und Zementzellen sowie aus Kalksalzen. Die chemische Analyse (ORBAN (29) u.a.) hat ergeben, daß das fertig gebildete Zement etwa 46% anorganische Substanzen, 22% organische Anteile und etwa 32% Wasser enthält. Die anorganischen Substanzen, die sich auf Grund der chemischen Analyse hauptsächlich aus Calciumsalzen mit Hydroxylapatitstruktur zusammensetzen, sollen in die homogene Kittsubstanz eingelagert sein. Die organischen Substanzen bestehen ebenfalls der chemischen Analyse sowie der spezifischen Anfärbbarkeit im histologischen Präparat zufolge vorwiegend aus Kollagen. Während die kollagenen Fibrillen der Grundsubstanz im allgemeinen als "unverkalkt" bezeichnet werden, sollen die eingebetteten SHARPEYschen Fasern mehr oder weniger stark "verkalkt" sein. Das Zement ist als mineralisiertes Binde- resp. Stützgewebe hinsichtlich seiner chemisch-qualitativen Zusammensetzung nahezu identisch mit Dentin und Knochen; mit dem letzteren hat es in bezug auf gewisse strukturelle Eigenheiten eine weitgehende Ähnlichkeit.

Im Hinblick auf die Anordnung der einzelnen Gewebselemente werden beim Zahnwurzelzement allgemein zwei Formen beschrieben. Die eine Form, die sich durch den Reichtum an dichtgedrängten, vorwiegend senkrecht zur Wurzeloberfläche ausgerichteten Faserbündeln resp. SHARPEYschen Fasern und durch

das Fehlen von eingebetteten Zementzellen auszeichnet, wird als zellfreies oder Faserzement bezeichnet; die zweite Form, die zusätzlich zu den SHARPEYschen Fasern noch Zementzellen mit zahlreichen Fortsätzen enthält, welche in Lakunen und Canaliculi in der verkalkten Grundsubstanz eingebettet sind, als zellhaltiges oder Osteozement. Beiden Formen gemeinsam ist eine lamelläre, der Wurzeloberfläche fast parallellaufende Schichtung, die beim zellfreien Zement oft gering, beim zellhaltigen Zement sehr stark ausgeprägt ist. In beiden Formen sollen die kollagenen Fibrillen der Grundsubstanz im Gegensatz zu den vorwiegend senkrecht verlaufenden SHARPEYschen Fasern parallel zur Wurzeloberfläche resp. zu den Lamellen angeordnet sein. Das zellfreie Zement kann, am Zahnhals beginnend, in einer oder mehreren dünnen Lagen das gesamte Wurzeldentin als zuerst aufgelagerte Schicht bedecken und ist dann im mittleren und apikalen Drittel der Wurzeln sowie im Bifurkationsgebiet mehrwurzliger Zähne von mehreren dicken Schichten zellhaltigen Zementes umgeben. Es kann aber bereits vom mittleren Wurzeldrittel an und besonders am Apex selbst fehlen, so daß dort zellhaltiges Zement dem Dentin aufgelagert ist. Schließlich können im gesamten Zement beide Formen miteinander abwechseln, und sehr oft wird zellfreies Zement auch als äußere Überkleidung des zellhaltigen Zementes angetroffen. Deshalb wird die von SHMAMINE (32) eingeführte Unterteilung in "primäres" und "sekundäres" Zement besonders in der neueren Literatur nur noch selten als ausschließliche Bezeichnung für die beiden Formen verwendet; HELD (15), EGLI (11), MEYER (24,25,26) u. a. lehnen sie unter Hinweis auf die eben geschilderten Verhältnisse und im Hinblick auf eine rein morphologische Betrachtungsweise eindeutig ab.

Die Vorstellungen, die man sich auf Grund der lichtmikroskopischen Untersuchungsergebnisse vom normalen histologischen Aufbau des Zementes macht, sind nur in ihren eben dargelegten Grundzügen einheitlich; bei der Erörterung spezieller Fragen über die einzelnen Gewebselemente, deren Anordnung und histologische Erscheinungsform weichen sie mitunter erheblich voneinander ab.

Während die Mehrzahl der Autoren nur über die beiden oben

beschriebenen Zementformen berichtet, wird neben den ersten Andeutungen über das Vorkommen einer "Zwischenzonen-" oder "interzonalen Schicht" bei BÖDECKER (4) und SHMAMINE (32) später von einigen Autoren eine besondere Schicht beschrieben, die zwar als "intermediäre" oder "Zementzwischenschicht" oder ähnlich bezeichnet wird, über deren Zugehörigkeit zum Dentin oder Zement jedoch keine klare Auffassung besteht. Im Bereich der Körnerschicht des Dentins, unmittelbar neben dieser oder zwischen Dentinoberfläche und Zement gelegen, soll sie als strukturlose, teilweise mit großen irregulären Hohlräumen oder protoplasmatischen Einschlüssen versehene Schicht weder die strukturellen Merkmale des Dentins noch des Zementes aufweisen. Sie soll scharf oder undeutlich gegen die beiden anliegenden Gewebe abgegrenzt und als zusammenhängender oder nur an einzelnen Stellen auftretender homogener Gewebsstreifen im gesamten Wurzelbereich oder nur in den apikalen Zweidritteln zu beobachten sein (THOMAS u. SKILLEN (33,34,35), BENCZE (2), EGLI (11), F.B.NOYES, SCHOUR u. H.J.NOYES (28), ORBAN (29), HELD (16), BLACKWOOD (3)).

Während von CH.S.TOMES (36), BOX (6), WALKHOFF (37,38) und anderen Autoren der Begriff "strukturlos" auf das Fehlen von Lakunen resp. Zementzellen oder auch Lamellen bezogen und für das zellfreie Zement insbesondere des Zahnhalsgebietes verwendet wird, bezeichnet KRONFELD (2o) vorwiegend die älteren tiefen Schichten des zellhaltigen Zementes als "mehr oder weniger strukturlos", weil dort die SHARPEYschen Fasern "in fortschreitender Verkalkung begriffen" seien und "in der homogenen Grundsubstanz aufgehen" sollen - ein Vorgang, auf Grund dessen sie GOTTLIEB (13) ebenfalls nicht mehr vom "verkalkten Zement unterscheiden" kann. F.B. NOYES, SCHOUR u. H.J.NOYES (28) führen diese Erscheinung auf den streckenweise von der Schnittrichtung abweichenden Verlauf der SHARPEYschen Fasern zurück. EGLI (11) und HATTYASY (14) bestreiten zwar nicht das Vorkommen scheinbar strukturloser, von SHARPEYschen Fasern freier Bezirke innerhalb des zellfreien und zellhaltigen Zementes; sie weisen jedoch durch Anwendung des Grünfilters oder mit Hilfe des Phasenkontrastes auch in diesen Gebieten eine deutliche Strukturierung nach.

Allgemein wird in der Literatur darauf hingewiesen, daß so-

wohl das zellfreie als auch in besonderem Maße das zellhaltige Zement aus mehreren Schichten besteht, aber die Erklärungen, worauf im histologischen Bild der optische Eindruck der Mehrschichtigkeit zurückzuführen ist, sind recht verschieden. Während sich in der älteren Literatur (CZERMAK (7), BÖDECKER (4,5), CH.S.TOMES (36) u.a.) lediglich Angaben über ein "lamelläres Aussehen" des Zementes finden und auch MEYER (24,25,26) nur von "Schichten" und "Lagen" berichtet, beobachtet SHMAMINE (32) "Lamellen" und zwischen diesen gelegene "feine, mittelbreite und breite Lamellenzwischenschichten" und begründet - wie später auch HELD (16) - deren optische Unterscheidung von den Lamellen auf Grund der unterschiedlichen Anfärbung im Präparat mit Verkalkungsunterschieden. Andere Autoren erkennen die Lamellen an Hand einer bestimmten Anordnung der größeren Faserbündel resp. der SHARPEYschen Fasern; bei allgemein senkrechter Verlaufsrichtung zur Wurzeloberfläche sollen, sofern nur eine Schicht vorliegt, die SHARPEYschen Fasern diese in ihrer ganzen Dicke ununterbrochen durchsetzen, oder, wenn mehrere Schichten zu beobachten sind, sollen diese durch einige Lagen kurzer übereinandergelagerter SHARPEYscher Fasern oder Fibrillenbündel gebildet werden (v.EBNER (9), WALKHOFF (37,38), DEWEY (8), LEHNER u. PLENK (23)). WALKHOFF (37,38) räumt dabei die Möglichkeit ein, daß mehrere Schichten auch von langen größeren SHARPEYschen Faserbündeln vereinzelt durchsetzt werden können. MÜLLER (27) unterscheidet die Schichten durch den Richtungswechsel der SHARPEYschen Fasern. Schließlich weisen KRONFELD (2o,21), F.B.NOYES, SCHOUR u. H.J.NOYES (28) und EGLI (11) nach, daß der Eindruck der Mehrschichtigkeit durch beide Faktoren, nämlich durch Verkalkungsunterschiede, die sich in der wechselnd intensiven Anfärbung äußern, und durch die Richtungsänderung der SHARPEYschen Faserbündel hervorgerufen wird. "Die feinen Lamellenzwischenschichten stellen ... nichts anderes dar als die Trennungslinie zwischen zwei in einem ... Rhythmus gebildeten Schichten von Zementgrundsubstanz. Wird dieser Rhythmus aus irgendeinem Grunde gestört, verlangsamt er sich, oder sistiert er für einige Zeit, so entstehen mittelbreite oder breite Lamellenzwischenschichten. ... Diese Zwischenschichten zeigen im Hämatoxilinpräparat eine andere Färbbarkeit, woraus, ebenso wie aus Schliffbildern, geschlos-

sen werden kann, daß der Grad der Verkalkung ein von der Umgebung verschiedener ist" (EGLI (11)). Das histologische Bild mehrschichtigen Zementes läßt den Untersuchungen EGLIs (11) zufolge verschiedene Besonderheiten erkennen: Entweder liegen nur Verkalkungsunterschiede der Schichten und Zwischenschichten oder nur ein Richtungswechsel der SHARPEYschen Fasern von Schicht zu Schicht vor; es können beide Faktoren vorhanden sein, die Zwischenschichten können fehlen oder auch durch starke SHARPEYstruktur verdeckt sein; die SHARPEYschen Fasern wiederum können auf eine Schicht begrenzt sein, oder einige oder alle können die Zwischenschichten überbrücken. - Da die mittelbreiten und breiten Lamellenzwischenschichten in besonders sinnfälliger Weise das intermittierende, periodische oder nicht-kontinuierliche Wachstum (ORBAN (29), JENKINS (17) u.a.) des Zementes deutlich machen, werden sie auch häufig in der Literatur als "incremental lines" oder "Wachstumslinien" bezeichnet.

Die Richtung der größeren Faserbündel resp. der SHARPEYschen Fasern wird in der gesamten Literatur im allgemeinen als senkrecht oder abwechselnd schwach geneigt zur Wurzeloberfläche verlaufend beschrieben. Sofern jedoch Angaben über den Verlauf der kollagenen Fibrillen der Grundsubstanz gemacht werden, bestehen wiederum verschiedene Auffassungen. Während v.KORFF (19) und MÜLLER (27) der Ansicht sind, daß die Grundsubstanzfibrillen senkrecht zur Wurzeloberfläche verlaufen, wird deren Richtung von LEHNER u. PLENK (23), EGLI (11), HELD (15), ORBAN (29) und MEYER (24,26) als parallel zur Wurzeloberfläche angegeben, und F.B.NOYES, SCHOUR u. H.J.NOYES (28) betonen, daß sie entsprechend der funktionellen Belastung angeordnet sind.

Im Zusammenhang mit den Beobachtungen, die über das Vorkommen und die Anordnung des zellfreien und des zellhaltigen Zementes gemacht worden sind, stellt die Frage, welche der beiden Zementformen dem Dentin unmittelbar anliege, ein viel umstrittenes Problem dar. Während allgemein keine Zweifel darüber bestehen, daß das Dentin im Zahnhalsgebiet ausschließlich von zellfreiem Zement bedeckt wird, liegen über die Verhältnisse am mittleren und apikalen Wurzeldrittel verschiedene Beobachtungen vor. Es lassen sich aber die Ansichten der

meisten Autoren dahingehend zusammenfassen, daß das Dentin des Zahnhalsgebietes nur von zellfreiem Zement bedeckt wird, während im mittleren und besonders im apikalen Wurzeldrittel das zellfreie Zement durchaus fehlen und daß dem Dentin dann an diesen Stellen zellhaltiges Zement anliegen kann (SHMAMINE (32), BOX (6), BENCZE (2), EGLI (11), F.B.NOYES, SCHOUR u. H.J.NOYES (28), HELD (15,16), ORBAN (29), JACCARD u. GROSJEAN (47), MEYER (24,25,26), BLACKWOOD (3), HATTYASY (14), HAIM (48), KETTERL (18), PRITZ (3o)). Den Resorptionsstellen des Dentins soll regelmäßig zellhaltiges Zement aufgelagert sein (v.EBNER (1o), PRITZ (3o) u.a.). Eine zusätzlich zwischen Dentin und dem eigentlichen Zement gelegene intermediäre Zementschicht wird von EGLI (11) manchmal an den marginalen Abschnitten, von BENCZE (2) und HELD (16) stets, von F.B.NOYES, SCHOUR u. H.J.NOYES (28) und ORBAN (29) gelegentlich in den apikalen Zweidritteln und von BLACKWOOD (3) nur im Bereich von zellhaltigem Zement, sofern dieses nicht direkt am Dentin liegt, beobachtet; THOMAS u. SKILLEN (33,34,35) treffen sie im gesamten Zahnwurzelbereich an. Schließlich soll noch erwähnt werden, daß KETTERL (18) "bei Zähnen alter Menschen ... - beginnend an der Wurzelspitze - zwischen Zement und dem durch Kanälchen charakterisierten Dentin eine unterschiedlich dicke Schicht einer homogen verkalkten, strukturlosen Hartsubstanz ..." (an anderer Stelle: "... eine homogene, verkalkte Zahnbeinschicht ... zwischen Osteozement und kanalisiertem Dentin ...") beobachten konnte.

Die Form der Zementdentingrenze wird im allgemeinen als normalerweise glatt oder, sofern Resorptionen der Dentinoberfläche vorgelegen haben, als buckelig oder gezackt bezeichnet (v.EBNER (1o), WALKHOFF (37,38), LEHNER u. PLENK (23), F.B. NOYES, SCHOUR u. H.J.NOYES (28), ORBAN (29)), während PRITZ (3o) stets "... in fast regelmäßigem Abstand an der Dentin-Zementgrenze darstellbare ... zapfenförmige Einsenkungen des Zementes in das Dentin ..." vorfindet.

Im Gegensatz zu SHMAMINE (32) und WALKHOFF (37,38), nach deren Mitteilungen sich das Zement immer durch eine deutliche Grenze scharf vom Dentin absetzt, kann auch ein "allmäliger Übergang" des Dentins in das Zement "ohne deutliche Grenzlinie" (BÖDECKER (4,5)) erfolgen und "... the fusion of the two

tissues being so intimate that it is often difficult to say precisely at what point the one may be said to have merged into the other" (CH.S.TOMES (36)). BLACKWOOD (3) stellt der scharfen Linie, die bei direkter Verbindung von zellfreiem oder zellhaltigem Zement mit dem Dentin vorliegt, die intermediäre Zementschicht gegenüber, und während HELD (16) ebenfalls im Hinblick auf die mögliche Existenz dieser Zwischenschicht darauf hinweist, daß "the cementodentinal border gradually fades when nearing the apex, ..." kommen JACCARD u. GROSJEAN (46) auf Grund ihrer reflexionsoptischen Untersuchungen zu einem ähnlichen Ergebnis: "Dès l' âge adulte, la limite dentine-cément est moins nette, dans la portion apicale particulièrement; il arrive même que le cément et la dentine se confondent."

Das Vorkommen von Verbindungen zwischen den Dentinkanälchen und den Canaliculi der Zementlakunen, also Anastomosen zwischen den Odontoblastenausläufern und den Zementzellfortsätzen über die Dentinzementgrenze hinweg, wird von SHMAMINE (32), WALKHOFF (37,38) und anderen Autoren abgestritten. Während DEWEY (8) betont, daß solche Verbindungen "im allgemeinen nicht" bestehen, kann sie v.EBNER (9,1o) nur "ausnahmsweise" beobachten. Viele Autoren haben sie jedoch in den verschiedensten morphologischen Varianten gesehen und beschrieben (BÖDECKER (4,5), CH.S.TOMES (36), THOMAS u. SKILLEN (33,34,35), BOX (6), SCHERBEL u. SCHOENLANK (31), LEHNER u. PLENK (23), BLACKWOOD (3), HATTYASY (14), HAIM (48) (an Milchzähnen), PRITZ (3o)). Die von diesen Autoren zum Teil als echte Anastomosen bezeichneten Verbindungen sollen entweder direkt im Bereich der Zementdentingrenze oder der intermediären Zementschicht bestehen oder unter Zwischenschaltung der Körnerschicht oder der Spalten und Hohlräume resp. protoplasmatischen Einschlüsse der intermediären Zementschicht zustandekommen. Mitunter werden Ausläufer der Dentintubuli in das Zement hinein beobachtet, ohne daß es zu Verbindungen mit den Zementlakunen kommt (WALKHOFF (37, 38), F.B.NOYES, SCHOUR u. H.J.NOYES (28)). KETTERL (18) weist darauf hin, daß die "... Dentinkanälchen ... bis in das mittlere Lebensalter hinein ... in unmittelbarer Berührung mit dem Zement ..." stehen - dies in Übereinstimmung mit PRITZ

(3o) -, daß sie aber in die von ihm bei älteren Menschen beobachtete strukturlose periphere Dentinschicht nur noch "unregelmäßig weit vordringen".

Die verschiedenen Auffassungen über die protoplasmatischen Verbindungen zwischen Zement und Dentin kommen schließlich auch in den wenigen widersprüchigen Angaben, welche in der Literatur über die Art der Zementdentinverbindung gemacht werden, zum Ausdruck. KÜHN (22), FÜRER (12) und BAUER (1) kommen auf Grund pathohistologischer Untersuchungen über Zementabrißfrakturen resp. über Kariesausbreitung an der Zementdentingrenze zu dem Schluß, daß zwischen Zement und Dentin keine feste, sondern eine "lose Verbindung" im Sinne einer "bloßen Aneinanderlagerung" bestehe. PRITZ (3o) spricht dagegen von einer "innigen Verwachsung", und nach CH.S.TOMES (36) ist "the cementum ... very closely, indeed inseparably, connected with the dentine, through the medium of the 'granular' layer of the latter". v.EBNER weist darauf hin, daß "beide Gewebe innig miteinander verkittet sind" (9), und sagt: "Die Verbindung von Zahnbein und Zement geschieht durch einfache Anlagerung, ohne daß eine Kontinuität der Elementarteile des einen Gewebes mit jenen des anderen stattfände" (1o). MEYER (26) trifft eine ähnliche Feststellung: "Das Zement ist mit dem Dentin verwachsen, es besteht zwischen beiden keine Verbindung." Abschließend sei zu dieser Frage B.ORBAN (29) zitiert: "The attachment of the cementum to the dentin ... is quite firm although the nature of this attachment has not been fully investigated. It appears from observations that, at the beginning of cementum development, the fibers of the future cementum matrix are firmly attached to the dentin surface ...".

Die polarisationsoptischen Untersuchungen (39-45) haben die aus der neueren lichtmikroskopischen Literatur bekannten Vorstellungen insbesondere über den Faserverlauf (EGLI (11) u.a.) bestätigt und erweitert sowie neue Erkenntnisse über die Form der Mineralisation des Zementgewebes vermittelt. Während zwar das Auflösungsvermögen des Polarisationsmikroskopes praktisch gleich dem des Lichtmikroskopes und damit die d i r e k t e Darstellung der Strukturen nicht verbessert

ist, ermöglicht die Wahrnehmung der Doppelbrechung - der positiv einachsigen Kollagenfibrillen und der negativ einachsigen Erdsalz-, d.h. Hydroxylapatit-Krystallite (SCHMIDT u. KEIL (45)) -, mit Hilfe des polarisierten Lichtes i n d i r e k t Rückschlüsse auf die Anordnung von Krystalliten und Geltexturen zu ziehen.

Erste Angaben über die Verwendung des polarisierten Lichtes werden bereits bei v.EBNER (9), später von CAPE u. KITCHIN (39) gemacht, und von KEIL (41) wird das erste polarisationsoptische Bild einer Faserzementschicht veröffentlicht. Während KEIL (42) den vorwiegend senkrechten Verlauf der Fasern in dünnem zellfreiem Zement beobachtet, weisen GUSTAFSON u. PERSSON (4o) sowohl in der zellfreien als auch in der zellhaltigen Form den von Schicht zu Schicht wechselnden, abgewinkelten Verlauf der SHARPEYschen Fasern nach. Zu recht plastischen Vorstellungen über den Faserverlauf, welche fast makroskopische Eindrücke vermitteln, haben die Untersuchungsergebnisse SCHMIDs (44) und NEHLMEYERs (43) geführt: SCHMID (44) stellt - analog zu EGLI (11) u.a. - am zellfreien Zement bis zu drei Schichten fest, die sich durch die wechselnde Verlaufsrichtung ihrer SHARPEYschen Fasern unterscheiden, und teilt das zellhaltige Zement in ein inneres "Gitter-Osteozement" und ein "darauf gelagertes 'parallelfaseriges Osteozement', dessen Faserrichtung schichtenweise wechselt", ein. "Als Ganzes bilden die Faserbündel im Zement ein Netzwerk von radiären, schrägen und tangentialen Zügen ...". In der Umgebung der Zementdentingrenze konnte SCHMID "protoplasmatische Fortsätze" beobachten: "Diese Gebilde zeigen sich bald als kolbig verdickte TOMESsche Fasern, die aus den Dentinkanälchen kommend, im Gitterzement enden; ... bald erscheinen sie als lange Ausläufer von Zementozyten, die in das Dentin eindringen. ... Die letzteren sind ausschließlich unter dem Gitterzement, nie aber unter dem zellfreien Faserzement zu beobachten. Sie lassen einen Zusammenhang mit Zementozyten vermuten." NEHLMEYER (43) weist darauf hin, "daß dem Zement eine durchaus geordnete fibrilläre Struktur zukommt", und bezeichnet "gekreuzte Schraubentouren" und "schwächere ..., parallel der Längsachse des Zahnes und senkrecht zu ihr verlaufende ... Bündel" als "Eigenwicklungen des Zementes", in

welche die "SHARPEYschen Fasern des Zahnhalteapparates ... nicht einstrahlen ..., sondern sie ... wie im Knochen ... durchdringen ...".

Die Art der Mineralisation schließlich wird durch KEIL (42) definiert: "Nirgends ist ... eine sphäritische Verkalkungsform im Zement zu finden, wie sie für das normale menschliche Dentin so charakteristisch ist. Das Zement zeigt also auch in dieser Beziehung, daß es dem Knochengewebe am nächsten steht, das von sphäritischer Verkalkung im allgemeinen frei befunden wird." - Im Zement sind demnach die "Krystallite ... nach der faserigen organischen Grundlage ausgerichtet ...", d.h., daß eine "'inotrope' Verkalkung vorliegt" (SCHMIDT u. KEIL (45)).

Die Ursache für die verschiedenen Ergebnisse und die daraus resultierenden unterschiedlichen Vorstellungen über die normale Histologie des Zahnwurzelzementes ist im wesentlichen darin zu suchen, daß die Strukturelemente dieses Gewebes - ebenso wie diejenigen der beiden anderen Zahnhartsubstanzen Dentin und Schmelz - in ihren Dimensionen dicht an oder unterhalb des Auflösungsvermögens liegen, welches mit Hilfe des Licht- oder Polarisationsmikroskopes oder durch die Anwendung anderer lichtoptischer Hilfsmittel erreicht werden kann. Diese Strukturelemente sind deshalb als Einzelobjekte der direkten Beobachtung nicht zugänglich; daß z.B. die organischen Faserelemente des Zementes - Fibrillen und SHARPEYsche Fasern - aus Kollagen bestehen, war bisher lediglich auf Grund der chemischen Analyse, der spezifischen Anfärbbarkeit im lichthistologischen Präparat und des indirekten polarisationsoptischen Nachweises bekannt. Nur die aus elektronenmikroskopischen Untersuchungen am Bindegewebe, speziell auch an mineralisierten Formen wie Knochen oder Dentin bekannten Ergebnisse ließen vermuten, daß das Zement Gewebsbestandteile von ähnlicher sublichtmikroskopischer Struktur enthält.

Erste elektronenmikroskopische Aufnahmen vom Zement liegen von GEROULD (49), HELMCKE (5o) sowie von TONGE u. BOULT (51) vor. Die von diesen Autoren veröffentlichten Abbildungen stammen von Präparaten, die mit Hilfe des Abdruckverfahrens

von Bruch- oder angeätzten Schliffoberflächen hergestellt wurden. Während bei den Abbildungen GEROULDs (49) keine irgendwie zu definierenden Objekte zu finden sind, ist auf den von HELMCKE (5o) gezeigten Bildern neben nicht deutbaren, verwirrend angeordneten Strukturen in der Grundsubstanz bereits das Abdruckbild von "feinen fibrillenähnlichen Elementen" und "kollagenartigen Fibrillen" zu erkennen. TONGE u. BOULT (51) bringen zwei ähnliche Abdruckaufnahmen zur Kenntnis mit dem Hinweis, daß es sich dabei um Fibrillen handele, welche die "characteristic 64o A. periodicity of collagen" aufweisen.

Das Interesse wird im Hinblick auf das oben Gesagte bei einer elektronenmikroskopischen Untersuchung auf alle jene Strukturelemente gelenkt sein, die bisher nicht direkt darstellbar waren; in der vorliegenden Arbeit soll deshalb der Versuch unternommen werden, diese Bestandteile und ihren geweblichen Zusammenhang sichtbar zu machen, die bisher vorliegenden elektronenmikroskopischen Ergebnisse zu erweitern und zunächst einen allgemeinen Überblick über den grundsätzlichen Aufbau des normalen Zahnwurzelzementgewebes des Menschen aus elektronenmikroskopischer Sicht zu gewinnen.

C. Material und Methode

I. Material

Für die Untersuchungen wurden extrahierte ein- und mehrwurzelige Zähne zweiter Dentition verschiedenen Alters verwendet, welche nicht parodontal erkrankt waren und deren Wurzeln sowohl makroskopisch als auch in den interessierenden Abschnitten lichtmikroskopisch keine pathologischen Veränderungen erkennen ließen.

Die Präparationen erfolgten entweder sofort nach der Extraktion oder nach vorläufiger Aufbewahrung der Zähne in einer Mischung aus 60 Teilen 95%igem Alkohol, 15 Teilen Glyzerin und 25 Teilen destilliertem Wasser.

II. Methode

1. Das Ultradünnschnittverfahren

Das für die Herstellung von Schnittpräparaten bestimmte Material wurde zunächst nach der von ROMEIS (65) angegebenen Methode entkalkt. Die Zähne wurden bei Zimmertemperatur 24 - 48 st in mehrfach erneuerte 5%ige Salpetersäure gelegt und jede Wurzel nach fortgeschrittener oder beendeter Entkalkung mit dem Skalpell oder der Rasierklinge durch Quer- und Längsschnitte in etwa 8-16 Segmente zerlegt. In einzelnen Fällen wurden von den Wurzeln zuerst Schliffe angefertigt, die verschiedenen interessierenden Gewebspartien unter dem Durchlicht- und Binokularlupenmikroskop mit Bleistiftstrichen umrandet und die Schliffe nach der Entkalkung in die markierten, im Mittel etwa 3×3 mm großen Einzelstücke zerteilt. Die so erhaltenen kleinen Gewebsstücke - ihrer topographischen Lage nach genau bezeichnet und in den folgenden Arbeitsgängen einzeln weiterverarbeitet - wurden danach bei Zimmertemperatur 24 st in 5%ige Natriumsulfatlösung gelegt, um die Quellung des Bindegewebes zu verhindern, und anschließend 12 st unter fließendem Leitungswasser ausgewaschen. - Alle im Verlauf der Objektvorbereitung notwendigen manuell-mechanischen Arbeiten wurden unter größtmöglicher Schonung des Ze-

mentes, der evtl. noch anhaftenden Periodontalfasern und der benachbarten Dentinabschnitte durchgeführt; die Bearbeitung erfolgte ausschließlich mit scharfgeschliffenen Skalpellen oder neuen Rasierklingen, und die einzelnen Gewebsstückchen wurden zum Transport stets mit feinen Präparierpinzetten an den zementfernen, nicht mehr zur Untersuchung gelangenden Dentinbezirken gefaßt.

Zur Fixation und Kontrastierung wurden die Gewebsstückchen bei Eisschranktemperatur 2 st in veronalacetatgepufferte isotonische 1%ige Osmiumtetroxidlösung gebracht und danach 1 st ebenfalls bei Eisschranktemperatur in Tyrodelösung ausgewaschen (PALADE (63)).

Nach stufenweiser Entwässerung der Gewebsstückchen in einer Alkoholreihe ansteigender Konzentration - bei Eisschranktemperatur 12 st in 7o%igem, 2 st in 9o%igem, 1 st in absolutem Alkohol und anschließend bei Zimmertemperatur nochmals 1 st in absolutem Alkohol - erfolgte die Einbettung in Modifikation des von NEWMAN, BORYSKO u. SWERDLOW (62) entwickelten Verfahrens. Die verwendete Methacrylatmischung enthielt entstabilisiertes n-Butylmethacrylat und Methylmethacrylat im Verhältnis 8:1 sowie einen Benzoylperoxid-Initiator-Zusatz. Zur Durchtränkung der Gewebsstückchen wurden diese bei Zimmertemperatur zweimal je 3o min in reine Methacrylatmischung gelegt, im Methacrylatbad 15 min mit der Wasserstrahlpumpe im Exsikkator evakuiert und nochmals 3o min in neue Flüssigkeit gebracht. Nach beendeter Imprägnation wurden die Gewebsstückchen einzeln in aufrechtgestellte und mit Methacrylatmischung vollgefüllte zylinderförmige Gelatinekapseln übertragen und eine 12-16stündige Polymerisation bei 6o°C im Trockenschrank durchgeführt. Innerhalb weniger Tage waren die Objektblöcke soweit erhärtet, daß sie nach Entfernung der Gelatinehülle zur Schnittherstellung vorbereitet werden konnten.

Die Präparation der Methacrylatblöcke, deren objekttragende Enden so angespitzt werden müssen, daß die für die elektronenmikroskopische Untersuchung vorgesehenen Objektstellen in den Spitzen 4seitiger stumpfwinkliger Pyramiden liegen, erfolgte von Hand mit der Rasierklinge unter dem Binokularlupenpräpariermikroskop. Die allgemeine Orientierung im Objekt

und die Lokalisation eines bestimmten Objektbereiches wurden auf verschiedene Weise vorgenommen. Bei den größeren Objekten (Wurzelsegmenten) wurden vor Beginn des Anspitzens und während des Anlegens der einzelnen Pyramidenflächen mit der Rasierklinge Probeschnitte angefertigt und unter dem Durchlichtmikroskop geprüft. Bei den kleineren Objekten (Wurzelschliffabschnitten) wurde der Methacrylatblock zunächst um ein Drittel oder die Hälfte seiner Länge gekürzt, indem das dem eingebetteten Objekt gegenüberliegende Ende mit der Rasierklinge plan abgeschnitten wurde. Auf einen Objektträger gestellt, wurde das Präparat im Methacrylatblock unter dem Durchlichtmikroskop untersucht, der Block nach der Orientierung und Auswahl eines bestimmten kleinen Bezirkes durch Einkerbungen an seiner Peripherie markiert und die erste Pyramidenfläche unter dem Präpariermikroskop geschnitten. Unter mehrmals wiederholter Prüfung des Präparates im Durchlichtmikroskop wurden dann die übrigen Pyramidenflächen angelegt. Diese Methode, bei welcher keine Probeschnitte abgetragen werden müssen, sondern das gesamte im Methacrylatblock eingebettete Objekt ohne zusätzliche Manipulationen durchlichtmikroskopisch kontrolliert werden kann, erwies sich nicht nur bei der Pyramidenpräparation als vorteilhaft. Sie bot auch eine einfache und ausreichend sichere Möglichkeit, während und nach der Anfertigung der Ultradünnschnitte (s.u.) z.B. festzustellen, welche Objekteinzelheiten innerhalb einer Schnittserie mit fortschreitender Tiefen- und Flächenausdehnung erfaßt wurden, oder die Form, Größe und Oberflächenbeschaffenheit des Anschnittes zu prüfen usw. Um in bestimmten Fällen eine grobe, im Elektronenmikroskop noch verfolgbare Richtungsorientierung in der Flächenebene der Ultradünnschnitte zu schaffen, wurden beim Anspitzen nicht immer alle vier Seitenflächen der Pyramiden gleich groß angelegt, sondern eine oder zwei Seiten mit verschiedener Größe hergestellt, so daß je nach der Pyramidenform außer quadratischen auch rechteckige oder trapezförmige Ultradünnschnitte entstanden. - Grundsätzlich wurden während der Anfertigung der Pyramiden nur solche Objektgebiete ausgewählt und lokalisiert, die nicht in unmittelbarer Nähe jener Außenflächen der Gewebsstückchen lagen, die trotz objektschonender Arbeitsweise bei der vorangegangenen Präparation durch Schliff, Schnitt oder

Berührung mit der Unterlage eine Veränderung oder Destruktion erfahren haben konnten.

Nach diesen Vorbereitungen wurden die Präparate an Ultramikrotomen mit mechanischem (nach PORTER u. BLUM) oder thermischem Vorschub (nach SJÖSTRAND) mit Glasmessern geschnitten. Die Ultradünnschnitte - mit einer durchschnittlichen Schichtdicke von 500-600 ÅE und einem maximalen Flächendurchmesser von 50-100 µ - wurden auf der Messeroberfläche in niedrigprozentigem Alkohol aufgefangen, mit Chloroformdämpfen gestreckt, auf formvarbefilmte Trägernetze - aus Kupfergewebe mit einem Durchmesser von 2,0 mm und einer Maschenweite von je 90 µ - aufgefischt und die an den Netzen haftenden Alkoholtropfen sofort mit Filtrierpapier abgesaugt. Der Ablauf des Schneidvorganges sowie das Auffangen, Strecken und Auffischen der Ultradünnschnitte erfolgten unter ständiger Kontrolle mit der Binokularlupe des Ultramikrotoms. Nach einer oder mehreren Schnittserien wurden die Präparate auf die oben beschriebene Weise - mit oder ohne Probeschnitt - im Durchlichtmikroskop auf die Beschaffenheit des Anschnittes untersucht, neue Gewebsbezirke lokalisiert, danach die Pyramiden unter dem Präpariermikroskop mit der Rasierklinge korrigiert resp. neu angespitzt und am Ultramikrotom bei gleichzeitigem Wechsel der Schneidekantenstelle oder Erneuerung des Glasmessers geschnitten usf.

Abschließend erfolgte eine kollagenspezifische Nachkontrastierung - modifiziert - nach WOHLFARTH-BOTTERMANN (66). Hierzu wurden die belegten Trägernetze etwa 30 Minuten nach dem Auffischen der Ultradünnschnitte bei Zimmertemperatur 1 st in 1%ige Phosphorwolframsäure gelegt, danach einige Minuten in destilliertem Wasser gereinigt und auf Filtrierpapier getrocknet.

Bis zur elektronenmikroskopischen Untersuchung, die in der Regel nach 12-16 Stunden erfolgte, wurden die Netze in einer geschlossenen Glasschale aufbewahrt.

2. Das Oberflächenabdruckverfahren

Die Zahnwurzeln wurden zunächst entweder mechanisch zerbro-

chen oder unter Wasserkühlung an der diamantierten rotieren= den Schleifscheibe und danach mit in destilliertem Wasser oder Glyzerin aufgeschwemmtem Carborund- oder Diamantinepul= ver auf der Glasplatte geschliffen. Unter dem Binokularlupen= präpariermikroskop wurden dann für die Untersuchung geeignete, d.h. unbeschädigte resp. von Schleifspuren freie Bruch- oder Schliffoberflächen ausgesucht und mit einem spitzen harten Bleistift etwa 2×2 mm große quadratische Zement- oder Zement= dentinbezirke markiert. Während die Bruchoberflächen nicht weiter vorbehandelt wurden, erfolgte bei den Schliffoberflä= chen eine 1-1o sec dauernde Anätzung in 1%iger Salzsäure. Zur Darstellung auch der peripheren Wurzelzementbezirke wurde aus präparations- und bedampfungstechnischen Gründen (s.u.) in einigen Fällen vor der Abdrucknahme eine etwa 2 mm breite Schicht von Phosphat- oder Steinzement rund um den Oberflä= chenrand angetragen.

Die Sekundärobjektpräparation erfolgte unter Modifikation der von MAHL (59,6o) und KÖNIG (58) angegebenen Methode mit Hilfe zweistufiger oder sog. Matrizenabdrücke im Triafol-Silicium= monoxid-Abdruckverfahren (beschrieben bei PFISTERER (64)): Die mit wenig Aceton benetzte Bruch- oder Schliffoberfläche wurde auf die mit einem Tropfen Aceton angelöste geriffelte Seite eines Stückes o,1 mm starker Triafol-BN-Folie gedrückt und der nach 5-8 min trockene Abdruck abgezogen. Der erste Abdruck wurde stets zur Reinigung der Präparatoberfläche be= nützt und verworfen. Von der Oberfläche des zweiten Triafol-Abdruckes ("Negativ", Matrize) wurde nach Entfernung der überstehenden Fahnen und Ränder dann ein Siliciummonoxid-Filmabdruck ("Positiv", Sekundärobjekt) hergestellt, indem im Hochvakuum von $1o^{-3}$-$1o^{-4}$ Torr molekulares Siliciummonoxid zuerst 9o ec schräg - unter Neigung des Abdruckes um 37° zur Verdampfungsquelle - und danach 45 sec senkrecht aufgedampft wurde. Vor der Auflösung der Triafolmatrize wurde die anhaf= tende Siliciummonoxidaufdampffilmschicht mit erwärmtem flüs= sigem Paraffin (Smp. 56-58°C) überzogen und nach dessen Er= starrung die Matrize bei Zimmertemperatur etwa 9o min in paraffingesättigtes filtriertes Methylacetat gelegt und an= schließend nochmals etwa 3o min in frischem Methylacetat nachgewaschen. Das die Filmschicht tragende Paraffinstück

wurde nach wenigen Stunden Trockenzeit mit der Rasierklinge unter dem Präpariermikroskop entlang der noch sichtbaren Graphitmarkierung in die Einzelstücke zerschnitten, diese mit der Filmschicht nach unten auf Objektblenden - aus Platiniridium mit einem Durchmesser von 2,o mm und einem Objektschlitz von 1,o mm Länge und 8o µ Breite - gebracht, mit kleinen Metallnetzen beschwert und die Blenden zweimal je 1 st zur Auslösung des Paraffins bei Zimmertemperatur in ein Toluolbad gestellt. Die entnommenen Blenden wurden schräg auf Filtrierpapier abgetupft und die Netze nach dem Antrocknen von der nun auf den Blendenoberflächen haftenden Filmschicht abgenommen.

(Das Antragen von Phosphat- oder Steinzement (s.o.) diente dazu, die abzudrückende Oberfläche zu vergrößern und die bei der Abdrucknahme meist entstehende hochgewölbte Abdruckfolienstufe, die nie vollständig mit dem Skalpell entfernt werden kann, weiter nach außen zu verlegen. Grenzt sie unmittelbar an die Objekt-, d.h. Zahnwurzelzementperipherie, so können bei der Bedampfung, insbesondere der Schrägbeschattung, je nach Lage des Abdruckes zur Bedampfungsrichtung entweder artefizielle Schattenbildungen entstehen, so daß die peripheren Filmschichten kontrastarm sind, oder der hochstehende Rand erhält einen - meist verstärkten - Filmüberzug, so daß die Gefahr besteht, daß dieser beim Auslösen des Paraffins auf die periphere Filmzone unter Faltenbildung umschlägt.)

In Anbetracht der während der Oberflächenuntersuchungen erhaltenen Ergebnisse wurde auf eine verfeinerte, evtl. gezielte Oberflächenvorbereitung und Abdrucktechnik in der vorliegenden Arbeit verzichtet. Die Gründe hierfür sollen in der Diskussion näher erläutert werden.

Die Untersuchung der Ultradünnschnitt- und Oberflächenabdruckpräparate wurde an Elektronendurchstrahlungsmikroskopen der Firma Siemens & Halske AG, Berlin-Siemensstadt, vom Typ "ÜM 100 b" (nach E. RUSKA und B. v. BORRIES) und "Elmiskop II" bei Beschleunigungsspannungen von 6o oder 8o kV durchgeführt. Die Aufnahmen wurden unter 12oo-15ooofacher Vergrößerung angefertigt und die Platten, soweit angebracht, 1,5-2fach lichtoptisch nachvergrößert.

3. Die Röntgenfeinstrukturanalyse

Die Strukturanalyse der anorganischen Substanz des Zement=gewebes wurde nach dem DEBYE-SCHERRER-Verfahren (NEFF (61)) durchgeführt. Hierzu wurden verschiedene, im Achatmörser pulverisierte Zementproben in sog. Markröhrchen - Glaskapil=laren aus Lindemannglas mit einer lichten Weite von o,6 mm - eingebracht, und in einer 57,5mm-Zylinderkammer mit Cu-Kα-Strahlung (4o kV, 17 mA) unter vorgeschaltetem Nickelfilter und Berylliumfenster bei einer Belichtungszeit von 12o min Rundblendenaufnahmen auf Agfa-Sino-Röntgenfilm hergestellt. Als Gerät wurde der "Debyeflex"-Röntgengenerator der Firma Seifert & Co., Hamburg, verwendet.

Alle Untersuchungen wurden in der Forschungsstelle für Mikro=morphologie im Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesell=schaft, Berlin-Dahlem, durchgeführt.

D. Ergebnisse

I. Die allgemeine Mikromorphologie des Zementes

Bei der elektronenmikroskopischen Abbildung von kalkfreien Ultradünnschnitten werden in der organischen Grundsubstanz des Zementgewebes überall die feinen quergestreiften kollagenen Fibrillen sichtbar. Durch diese Fibrillen, die das gesamte elektronenmikroskopische Bild beherrschen, wird die Struktur der Zementgrundsubstanz bestimmt und gekennzeichnet. Sie zeigen teils einen geradlinigen, teils einen welligen, leicht geschwungenen oder stärker abgebogenen Verlauf, dem sie nur selten als Einzelfibrillen, meistens in Form kleinerer oder größerer Fibrillengruppen und -stränge folgen. Dementsprechend verschiedenartig ist auch ihre Anordnung: Sie können z.B. fast parallel zueinander ausgerichtet und über kürzere oder längere Strecken im Ultradünnschnitt verfolgbar sein (Abb.1), oder aber sie zeigen eine geflechtähnliche Anordnung, die durch den häufig wechselnden parallelen, schrägen oder queren Anschnitt solcher geschwungen oder abgebogen verlaufender Fibrillengruppen und -züge zum Ausdruck kommt (Abb.2,3).

Regelmäßig sind in der Zementgrundsubstanz Bündel anzutreffen, die aus einer großen Anzahl einzelner quergestreifter kollagener Fibrillen bestehen, welche morphologisch völlig identisch mit den Fibrillen der übrigen Zementgrundsubstanz sind. Bei diesen Fibrillenbündeln handelt es sich um die SHARPEYschen Fasern. Sie sind von nahezu rundem Querschnitt, der sich bei schrägem Anschnitt oval darstellt, und oft von einer geringen Anzahl zirkulär verlaufender Fibrillen umsponnen (Abb.4,6). Durch diese runde Form und durch die umgebenden zirkulären Fibrillen sind sie bei querem oder schrägem Anschnitt stets deutlich auszumachen, gleichgültig, ob sie vereinzelt innerhalb einer sonst anders strukturierten Grundsubstanz oder in großer Anzahl dicht nebeneinander liegend anzutreffen sind (siehe hierzu Abb.2o,21). Längsschnitte von SHARPEYschen Fasern zeigen deutlich den leicht gewellten, meist parallelen Verlauf der einzelnen, im Bündel zusammengefaßten quergestreiften kollagenen Fibrillen (Abb.5,

7-12). Verlaufen die SHARPEYschen Fasern in einer Richtung, die sich von der der umgebenden Fibrillenmasse unterscheidet, so sind sie stets deutlich erkennbar. Bei streckenweise gleicher Verlaufsrichtung mehrerer nebeneinander liegender SHARPEYscher Fasern kann die Abgrenzung etwas erschwert sein, wenn nur wenige zirkuläre Fibrillen vorliegen. Solche Fälle sind aber nur selten zu beobachten. Meist befinden sich genügend andersgerichtete Einzelfibrillen zwischen den SHARPEYschen Fasern, so daß diese voneinander unterschieden werden können (vgl. Abb.2o). Die Dicke der einzelnen SHARPEYschen Faser ist nicht gleichmäßig; sie ändert sich mit der Aufnahme oder Abgabe von Fibrillen. Die einzelnen SHARPEYschen Fasern können über längere Strecken einen nur schwach abgebogenen Verlauf haben, sie können aber auch sehr abrupten Richtungsänderungen unterworfen sein, wie z.B. die Abb. 13 u. 2o zeigen.

Das Zementgewebe ist durch die überall anzutreffenden quergestreiften kollagenen Fibrillen der organischen Grundsubstanz in allen seinen Teilen strukturiert. Die Besonderheiten dieser Strukturierung, die sich wesentlich von der der Dentingrundsubstanz (Abb.14) unterscheidet, sollen im Abschnitt über die spezielle Mikromorphologie beschrieben werden.

Innerhalb der organischen Grundsubstanz sind nur die quergestreiften kollagenen Fibrillen sichtbar. Die zwischen den Fibrillen befindliche K i t t s u b s t a n z , die aus einem Mucopolysaccharidkomplex bestehen soll, ist wenig strahlabsorbierend und erscheint elektronenoptisch homogen.

Die a n o r g a n i s c h e S u b s t a n z des Zementes besteht, wie die Röntgenbeugungsaufnahmen von Zementproben als qualitativer Nachweis ergeben, aus H y d r o x y l a p a t i t . Die in Abb.15 sichtbaren Liniengruppen des DEBYE-SCHERRER-Diagrammes stimmen in ihrer Anordnung und in ihren Abmessungen mit den bei HAYEK, NEWESELY, HASSENTEUFEL u. KRISMER (55) mitgeteilten Röntgendaten des Hydroxylapatits überein, wie auch ein Vergleich mit einer Testaufnahme von hydrothermalem Hydroxylapatit (Abb.16) zeigt. Die nicht so scharf ausgeprägte Linienzeichnung der Abb.15 deutet jedoch darauf hin, daß die Hydroxylapatitkristalle des Zementes nicht sehr gut ausgebildet sind.

Den Lakunen und Canaliculi des zellhaltigen Zementes entsprechen im kalkfreien Ultradünnschnitt deutlich abgrenzbare, mehr oder weniger glattrandige Aussparungen der Grundsubstanz (Abb.17,18). Die Zellen lassen, soweit sie überhaupt darstellbar sind, Reste des Kerns, des Protoplasmas und an einigen Stellen auch der Zellmembran (Abb.22) erkennen. Je nach Lage des Ultradünnschnittes können dabei die Abgangsstellen einiger Canaliculi von den Lakunen aus im Schnitt mit erfaßt sein und ein kurzes Stück weit, d.h. solange sie noch in der Ultradünnschnittebene verlaufen, verfolgt werden. Es sei jedoch hier bereits erwähnt, daß protoplasmatische Zellreste nur in den Lakunen der oberflächlichen zellhaltigen Zementschichten, nicht aber in denjenigen der tieferen Schichten angetroffen wurden.

II. Die spezielle Mikromorphologie des Zementes

Die Grundsubstanz des zellfreien Zementes ist dadurch gekennzeichnet, daß die Fibrillen innerhalb der einzelnen Schichten vorwiegend parallel zueinander ausgerichtet sind und einen fast geradlinigen (Abb.34-42) oder leicht wellenförmigen Verlauf (Abb.32,33) zeigen. Die Vorzugsrichtung der Fibrillen in den einzelnen Schichten wird im allgemeinen nie durch andersverlaufende Fibrillengruppen oder -bündel unterbrochen. Lediglich in den peripheren Bezirken mehrschichtigen zellfreien Zementes kann man Fibrillengruppen oder größere Bündel (SHARPEYsche Fasern) mit deutlich voneinander abweichender Verlaufsrichtung beobachten (Abb.1).

Im Gegensatz hierzu steht die Grundsubstanzstruktur des zellhaltigen Zementes, die all die vielfältigen Formen in Anordnung und Verlauf der Fibrillen aufweist, wie sie bereits im Abschnitt über die allgemeine Mikromorphologie beschrieben wurden. Charakteristisch ist hierbei, daß neben Bezirken, die durchaus eine übersichtliche Strukturierung der Grundsubstanz durch gut ausgebildete und abgrenzbare größere Fibrillengruppen und SHARPEYsche Fasern aufweisen, im gesamten zellhaltigen Zementgewebe regelmäßig Gebiete anzutreffen sind, die eine geflechtartige Grundsubstanzstruktur zeigen. Während z.B. auf den Abb.19-21 das gesamte elektronenmikro-

skopische Bild von quer- und längsgeschnittenen SHARPEYschen Fasern und den sie umgebenden zirkulären Fibrillengruppen beherrscht wird, zeigen die Abb.22-24 eine weitgehend diffusgeflechtähnliche Anordnung der Fibrillen. Einzeln oder zu kleinen Strängen oder Zügen zusammengefaßt oder lose gruppiert, verlaufen sie büschel-, fieder- oder arkadenförmig nach allen Richtungen, ohne eine bestimmte Ausrichtung, ein bestimmtes Ordnungsprinzip erkennen zu lassen. Eine solche Anordnung ist typisch für die Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes und macht die Unterschiede zum zellfreien Zement deutlich. - Die Zementlakunen und Canaliculi sind, wie bereits erwähnt, im gesamten zellhaltigen Zement deutlich als Aussparungen der Grundsubstanz zu erkennen. In den Lakunen der mittleren und oberflächlichen Schichten können die Reste verschiedener Zellbestandteile beobachtet werden. Während in den Abb.23 u. 24 Protoplasmareste zu sehen sind und die Zellkerne nicht mehr in der Ultradünnschnittebene liegen, weist die in Abb.19 sichtbare Lakune noch einen Teil des Zellkerns auf. In Abb.22 sind außer der eigentlichen Zementlakune auch die Abgangsstellen einiger Canaliculi zu erkennen sowie die von der Wandung abgelöste Zellmembran. Ähnliche Schnitte wurden bereits in den Abb.17 u. 18 gezeigt. In den Zementlakunen der tieferen Schichten wurden keine Zellbestandteile vorgefunden; sie stellten sich regelmäßig als leere Hohlräume dar.

Im Einzelfall erschweren die geringe Flächengröße (ca. 50 bis 80 µ) und die minimale Dicke (ca. 500 ÅE) der Ultradünnschnitte, eine exakte Aussage über die jeweilige Fibrillen- resp. Faserrichtung in bezug auf die Gesamttopographie der Zahnwurzel zu machen. Aus den sich immer wiederholenden und einander weitgehend ähnlichen Befunden an Quer- und Längsschnitten geht aber hervor, daß sowohl die einzelnen Fibrillen als auch die Fibrillengruppen und die SHARPEYschen Fasern das Zementgewebe in vielen Richtungen durchziehen. Die kollagenen Fibrillen können zwar manchmal im Zuge ihres Verlaufs parallel zur Zementoberfläche angeordnet sein; im zellfreien Zement sind sie jedoch vorwiegend senkrecht zur Zementdentingrenze und der Zementperipherie orientiert und verlaufen im zellhaltigen Zement in den verschiedensten Richtungen. Die immer angedeuteten Vorzugsrichtungen innerhalb einzelner Zementgebie-

te lassen weiterhin erkennen, daß das zellhaltige Zement aus einem dichten Flechtwerk von in flachem Winkel auf- und absteigenden, radiär, schräg und zirkulär-tangential verlaufenden Einzelfibrillen, Fibrillengruppen und SHARPEYschen Fasern besteht.

Die elektronenmikroskopischen Befunde am Zementgewebe der Bifurkationen (Abb.25-28) zeigen eine große Ähnlichkeit dieser Gebiete mit dem zellhaltigen Zement.

Auch die physiologischen Appositionen neuer Lamellen im Bereich des mittleren oder apikalen Wurzeldrittels haben eine der Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes weitgehend ähnliche Struktur. Auch hier ist der häufige Wechsel zwischen SHARPEYschen Fasern, größeren und kleineren Fibrillengruppen, Fibrillenbüscheln, -strängen usw. in unterschiedlichem Anschnitt, der auf verschiedene Richtungen hindeutet, typisch (Abb.29). Die Ultradünnschnitte, die im Bereich von Lamellenzwischenschichten angefertigt wurden, lassen erkennen, daß diese eine von den anliegenden Lamellen abweichende Struktur haben, die sich durch schmale Streifen dichter gelagerter und anders ausgerichteter kollagener Fibrillen oder SHARPEYscher Fasern äußert (Abb.30,31).

III. Das Zement und die angrenzenden Gewebe

Die Zementdentingrenze (Abb.32-36, 38-42) ist bei der elektronenmikroskopischen Ultradünnschnittuntersuchung im gesamten Zahnwurzelbereich deutlich zu erkennen. Sie stellt einen direkten Übergang der eng vernetzten Dentingrundsubstanzfibrillen in die Fibrillen der Zementgrundsubstanz dar, der außerdem durch eine deutliche, zur Grenzfläche etwa senkrechte Ausrichtung der letztgenannten Fibrillen gekennzeichnet ist. Durch die direkte Aneinanderlagerung der Fibrillen der beiden Grundsubstanzformationen ist das Zement mit dem Dentin organisch verbunden. In elektronenmikroskopischen Abmessungen gesehen, kann die Grenze fast geradlinig oder leicht geschwungen sein (Abb.38-42), sie kann aber auch rundliche Ausbuchtungen haben (Abb.32,33), oder einzelne Zementfibrillengruppen springen stellenweise in unregelmäßigen Ab-

ständen eine kurze Strecke weit in die Dentingrundsubstanz vor, so daß die Grenze dann an solchen Stellen leicht gezackt erscheint (Abb.34-36). Im gesamten Zahnwurzelbereich liegt dem Dentin zellfreies Zement an. In Abb.38-42 ist über dem Dentin eine unregelmäßig schmale Schicht zellfreien Zementes zu sehen, auf welche nach allmählich erfolgendem Richtungswechsel unter Verlust der für das zellfreie Zement typischen Parallelität der Fibrillen die zellhaltige Zementschicht folgt. Wie im übrigen Zementgewebe, so läßt sich auch in unmittelbarer Nähe der Zementdentingrenze nirgends strukturloses Zement finden. Die Dentinkanäle oder deren Ausläufer sind in unmittelbarer Nähe der Dentinperipherie nicht zu beobachten gewesen. Auch Hohlräume, Zementcanaliculi oder Dentinkanälchen wurden an der Zementdentingrenze nicht gefunden.

Zum Abschluß seien noch an den Abb.43-52 die SHARPEYschen Fasern des Periodontiums demonstriert. Die Übersichts- und Einzelaufnahmen zeigen kürzere oder längere Teile von SHARPEYschen Fasern, die noch an der Zementoberfläche haftengeblieben waren und die auch hier als Bündel quergestreifter kollagener Fibrillen imponieren. Teilweise sind zwischen den Fasern noch destruierte Kern- resp. protoplasmatische Reste von Zementoblasten zu sehen. Auf den Abb.43,44,5o u.51 ist die Insertion der SHARPEYschen Fasern im Zementgewebe sichtbar.

IV. Ergebnisse der Oberflächenabdruckuntersuchungen

Die Abdruckbilder (Abb.53-55), die man von Brüchen oder von geätzten und nicht geätzten Schliffen vom Zement erhält, lassen in der anorganischen Substanz an einigen Stellen den Abdruck von Teilen quergestreifter kollagener Fibrillen im Längs- oder Querschnitt erkennen. Im letzteren Falle hat die Oberfläche ein poröses Aussehen, das durch die freigelegten Querschnitte der Fibrillen zustande kommt. Häufig sind rundliche schollenartige Plateaus zu erkennen, bei welchen es sich um die SHARPEYschen Fasern zu handeln scheint.

Abbildungen

Entsprechend den im Abschnitt über Material und Methode gegebenen Hinweisen handelt es sich bei den Abbildungen Nr. 1 bis 14 und Nr. 17 bis 52 um Ultradünnschnitte von mit Salpetersäure entkalkten, mit Osmiumtetroxid fixierten, mit Phosphorwolframsäure nachkontrastierten und in Methacrylat eingebetteten Präparaten aus dem Wurzelzement permanenter Zähne des Menschen. - Die Abbildungen Nr. 15 und 16 stellen Röntgenbeugungsaufnahmen der anorganischen Substanz des Zahnwurzelzementes und hydrothermalen Hydroxylapatits dar. - Die Abbildungen Nr. 53 bis 55 geben die von Brüchen und Schliffen des Zahnwurzelzementes im Oberflächenabdruckverfahren gewonnenen Siliciummonoxidaufdampffilmschichten wieder.

EO = Elektronenoptik, GV = Gesamtvergrößerung. +)

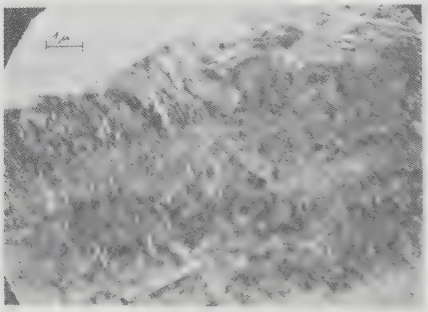

Abb. 1 Organische Grundsubstanz des zellfreien Zementes. Gruppen parallel angeordneter Fibrillen, die fast senkrecht zur Zementoberfläche ausgerichtet sind. Daneben größere Fibrillengruppen anderer Verlaufsrichtung in querem und schrägem Anschnitt. - Querschnitt aus einer peripheren Schicht mehrschichtigen zellfreien Zementes im koronalen Wurzeldrittel.
EO 72oo:1

+) Die in Zahlen angegebenen Vergrößerungen beziehen sich auf die Originalphotos. Bei der Drucklegung werden die Abbildungen um ca. 3o % verkleinert, so daß zur Ermittlung der wirklichen Vergrößerung auf den eingezeichneten Vergleichsmaßstab verwiesen werden muß. - Beim Druck gehen die Feinheiten der Abbildungen durch die Verwendung des Rasters verloren.

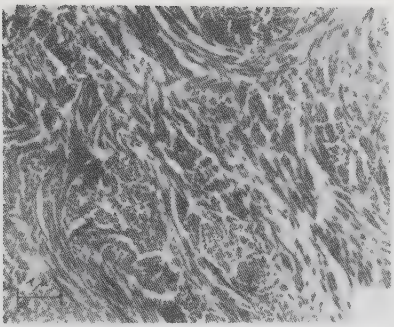

Abb. 2 **Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes.** Einzelfibrillen und Fibrillengruppen verschiedener Anordnung und Verlaufsrichtung in wechselndem Anschnitt. - Querschnitt aus mittlerem Wurzeldrittel.

EO 8ooo:1

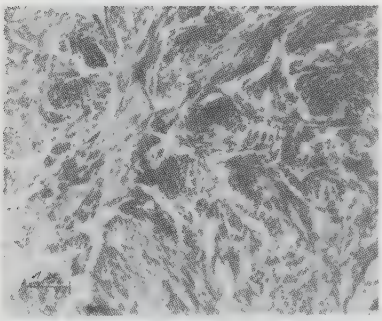

Abb. 3 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. Einzelfibrillen und Fibrillengruppen verschiedener Anordnung und Verlaufsrichtung in parallelem und schrägem Anschnitt, kleine SHARPEYsche Fasern im Querschnitt. - Querschnitt aus peripherem Appositionszement im mittleren Wurzeldrittel.

EO 8ooo:1

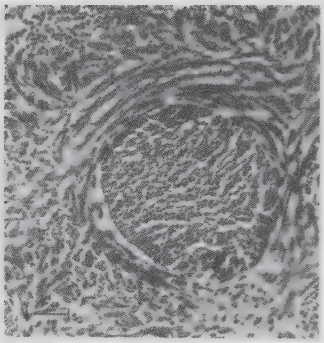

Abb. 4 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. SHARPEYsche Faser im Querschnitt, von zirkulären Fibrillen umgeben. - Querschnitt aus mittlerem Wurzeldrittel.

EO 8ooo:1

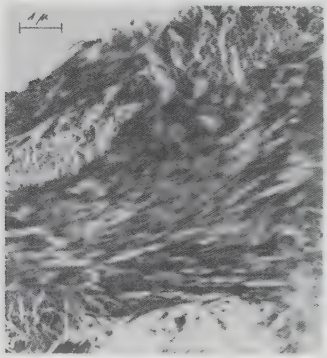

Abb. 5 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. Teil einer SHARPEYschen Faser im Längsschnitt. - Querschnitt aus mittlerem Wurzeldrittel.

EO 8ooo:1

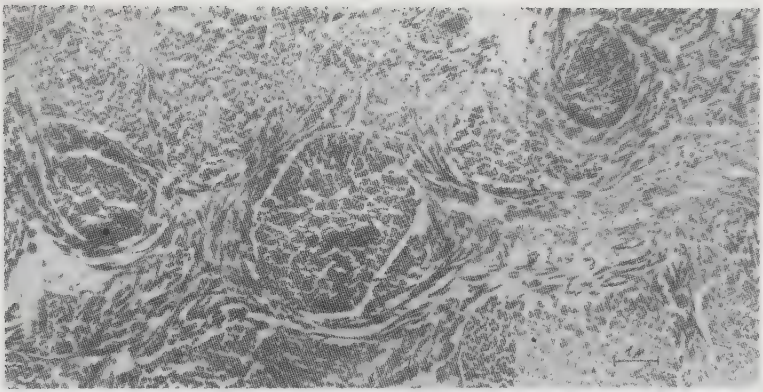

Abb. 6 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. SHARPEYsche Fasern in querem und schrägem Anschnitt, von zirkulären Fibrillen umgeben. - Querschnitt aus mittlerem Wurzeldrittel.

EO 8ooo:1

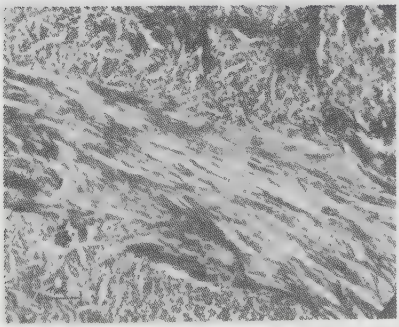

Abb. 7 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. Teil einer SHARPEYschen Faser im Längsschnitt. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 8ooo:1

Abb. 8 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. Große SHARPEYsche Fasern in parallelem, kleinere in schrägem und querem Anschnitt, teilweise von zirkulären Fibrillen umgeben. Die Lakune enthält Reste des Zellkerns, in ihrer unmittelbaren Umgebung sind Teile der Canaliculi im Schnitt mit erfaßt. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 12oo:1 GV 24oo:1

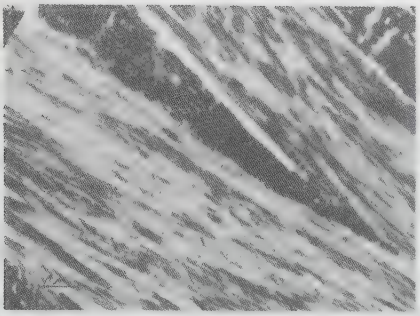

Abb. 9 Ausschnitt aus Abb.8 in höherer Vergrößerung. Teile zweier SHARPEYscher Fasern im Längsschnitt.
EO 72oo:1

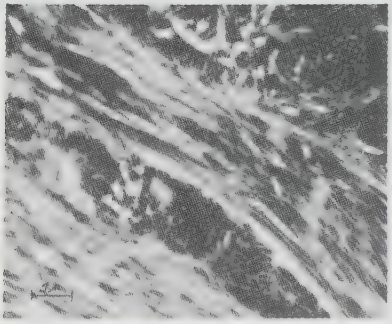

Abb. 1o Ausschnitt aus Abb.8 in höherer Vergrößerung. Teile zweier SHARPEYscher Fasern im Längsschnitt.
EO 72oo:1

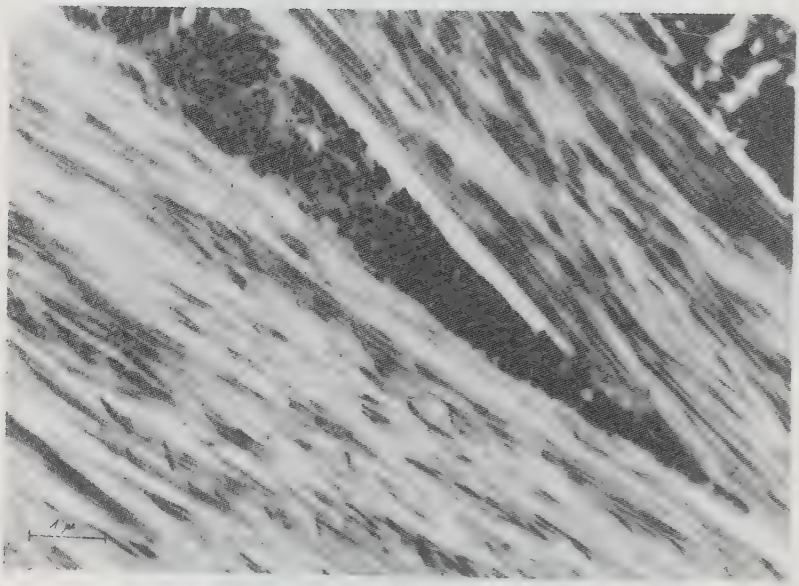

Abb. 11 Höhere Vergrößerung der Abb.9 .
EO 72oo:1 GV 144oo:1

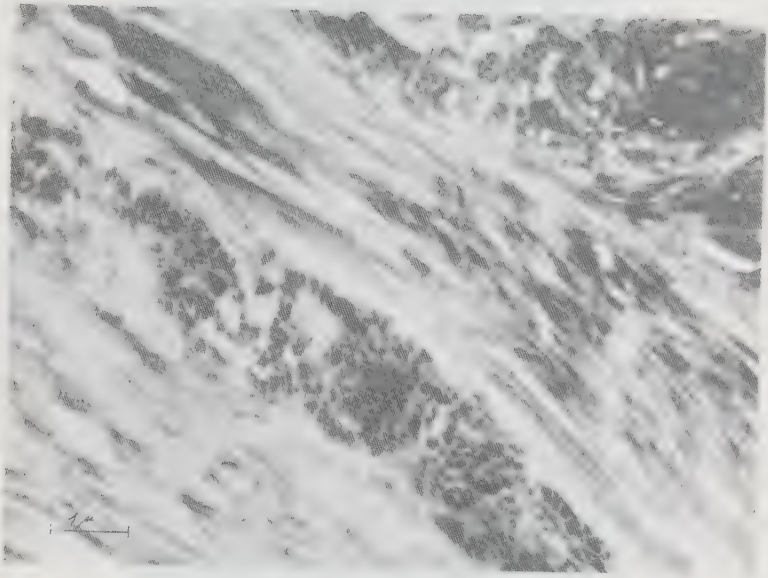

Abb. 12 Höhere Vergrößerung der Abb.1o .
EO 72oo:1 GV 144oo:1

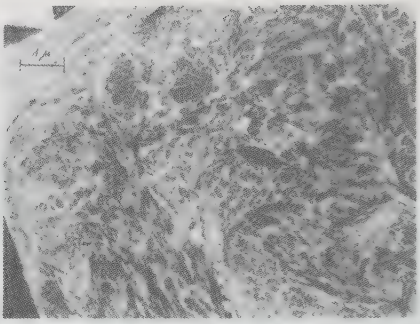

Abb. 13 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. Einzelfibrillen, Fibrillengruppen und -bündel verschiedener Anordnung und Verlaufsrichtung in wechselndem Anschnitt. Links ist die Richtungsänderung einer SHARPEYschen Faser angedeutet. - Querschnitt aus einer Appositionszementschicht im mittleren Wurzeldrittel.

EO 8ooo:1

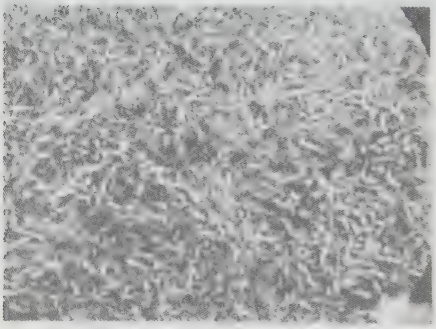

Abb. 14 Organische Grundsubstanz des Dentins.

EO 72oo:1

Abb. 15

Abb. 16

Abb. 15 DEBYE-SCHERRER-Diagramm der anorganischen Substanz des Zahnwurzelzementes des Menschen. Hydroxylapatit.

Abb. 16 DEBYE-SCHERRER-Diagramm von hydrothermalem Hydroxylapatit.

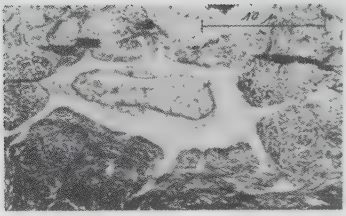

Abb. 17 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. Zementlakune als Aussparung der Grundsubstanz mit Zellkern- und protoplasmatischen Resten. An der Peripherie der Lakune sind die Abgangsstellen einiger Canaliculi zu erkennen. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 12oo:1 GV 24oo:1

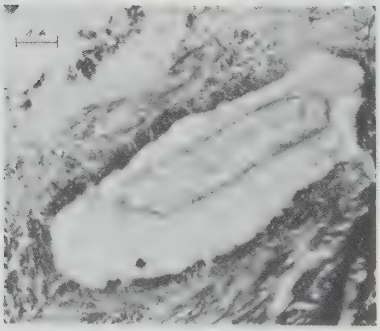

Abb. 18 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. Zementlakune als Aussparung der Grundsubstanz mit Zellkern- und protoplasmatischen Resten. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 8ooo:1

Abb. 19 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. Einzelfibrillen, Fibrillengruppen und SHARPEYsche Fasern im Längs- und Querschnitt; Zementlakune mit Zellkernresten. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 1200:1 GV 2400:1

Abb. 2o Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. Einzelfibrillen, Fibrillengruppen und SHARPEYsche Fasern im Längs- und Querschnitt. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 12oo:1 GV 24oo:1

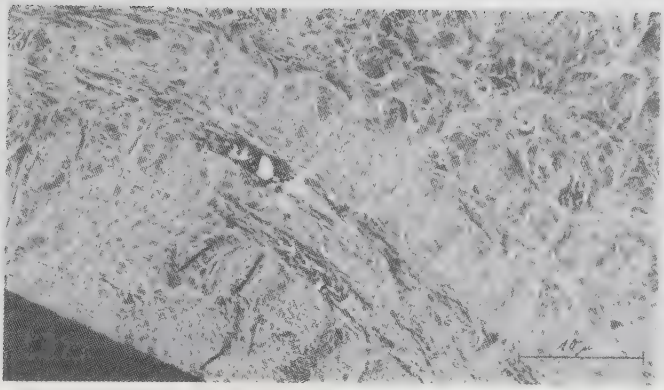

Abb. 21 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes mit SHARPEYschen Fasern im Querschnitt, von zirkulären Fibrillen umgeben. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 12oo:1 GV 24oo:1

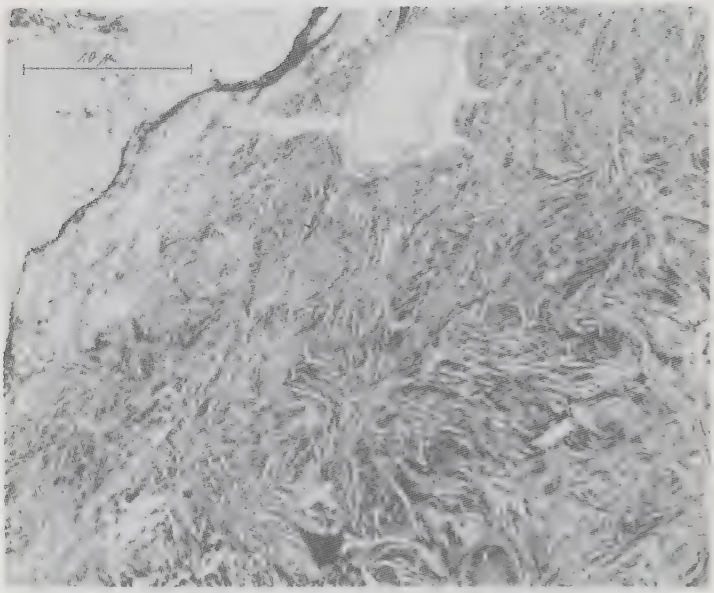

Abb. 22 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes mit Fibrillen, Fibrillengruppen und einigen SHARPEYschen Fasern verschiedener Anordnung und Verlaufsrichtung in wechselndem Anschnitt. In der Zementlakune sind die abgelöste Zellmembran sowie die Abgangsstellen einiger Canaliculi zu erkennen. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 1600:1 GV 3200:1

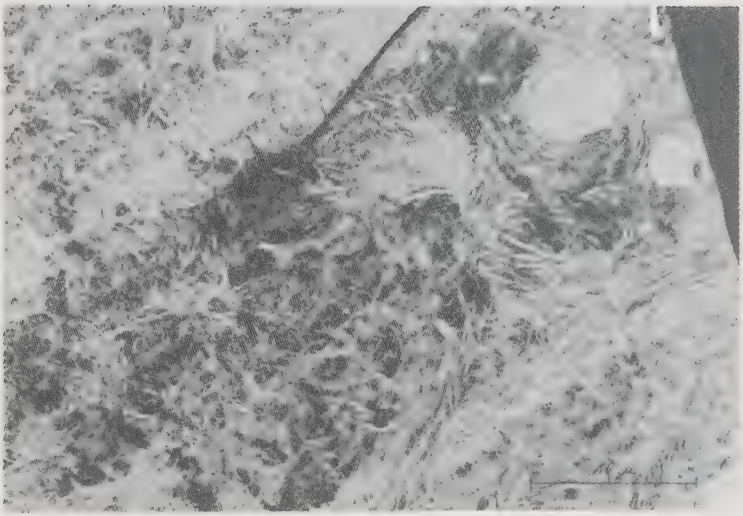

Abb. 23 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. Einzelfibrillen und Fibrillengruppen in unterschiedlicher Anordnung und Verlaufsrichtung in wechselndem Anschnitt. Die beiden Zementlakunen enthalten destruierte protoplasmatische Reste. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 1600:1 GV 3200:1

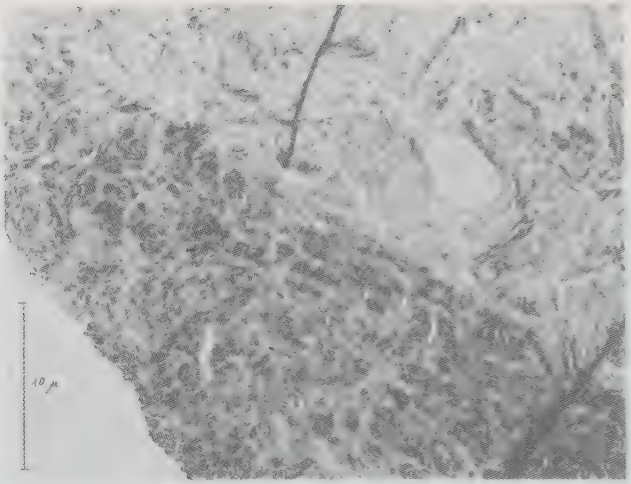

Abb. 24 Organische Grundsubstanz des zellhaltigen Zementes. Einzelfibrillen, Fibrillengruppen und einige kleinere SHARPEYsche Fasern verschiedener Anordnung und Verlaufsrichtung in wechselndem Anschnitt. Die Zementlakune enthält destruierte protoplasmatische Reste. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 1600:1 GV 3200:1

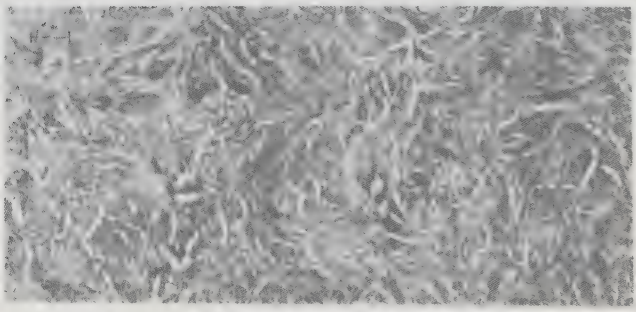

Abb. 25 Organische Grundsubstanz des Bifurkationszementes. Wurzellängsschnitt.

EO 7200:1

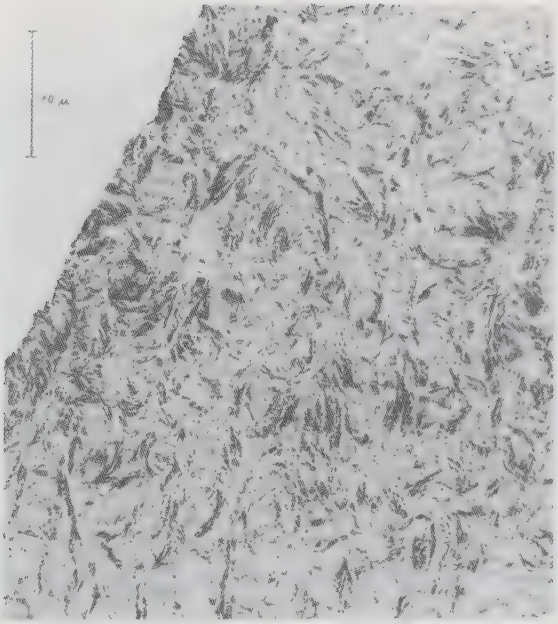

Abb. 26 Organische Grundsubstanz des Bifurkationszementes. Wurzellängsschnitt.

EO 12oo:1 GV 24oo:1

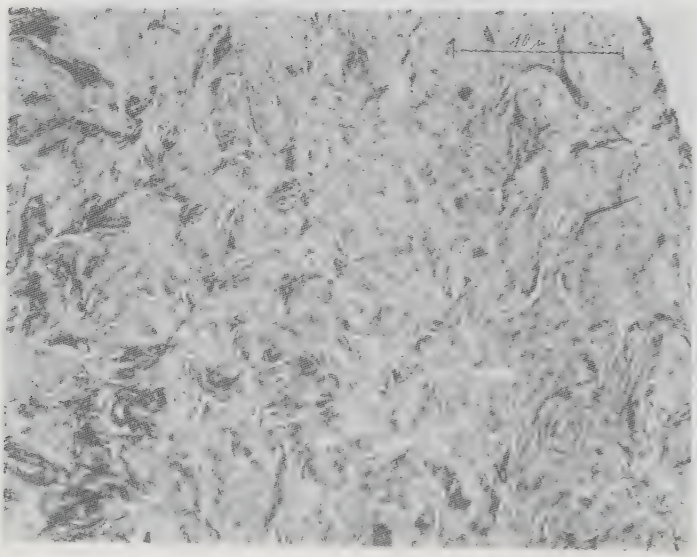

Abb. 27 Organische Grundsubstanz des Bifurkationszementes. Wurzellängsschnitt.
EO 16oo:1 GV 32oo:1

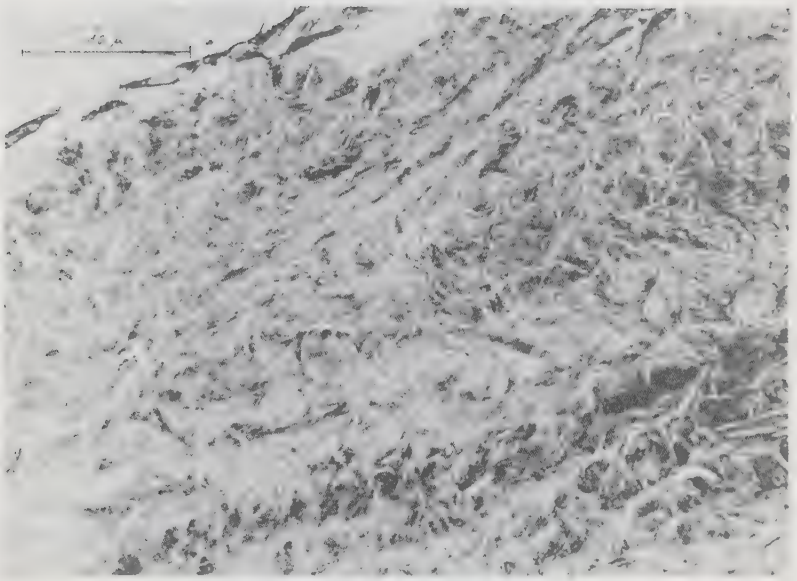

Abb. 28 Organische Grundsubstanz des Bifurkationszementes. Wurzellängsschnitt.

EO 1600:1 GV 3200:1

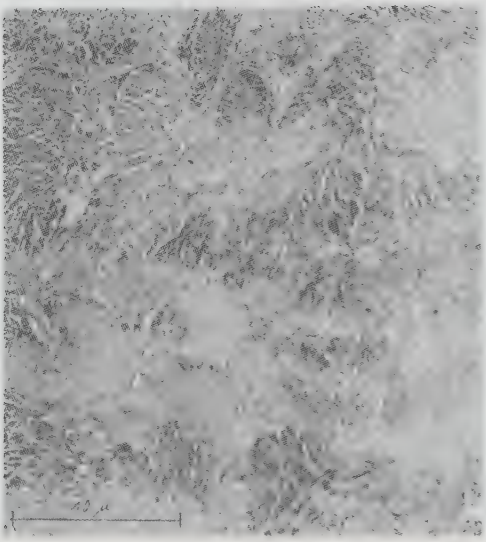

Abb. 29 Organische Grundsubstanz des Appositionszementes. - Querschnitt aus peripherem Appositionszement im mittleren Wurzeldrittel.

EO 1600:1 GV 3200:1

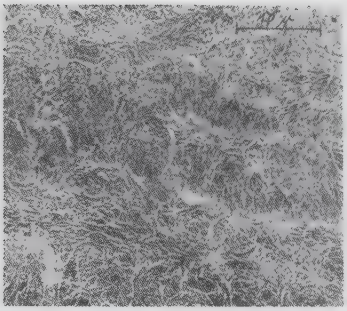

Abb. 3o Organische Grundsubstanz des Appositionszementes im Bereich einer Lamellenzwischenschicht. - Quer= schnitt durch Appositionszement im mittleren Wur= zeldrittel.

EO 16oo:1

Abb. 31 Organische Grundsubstanz des Appositionszementes im Bereich feiner Lamellenzwischenschichten. - Querschnitt durch Appositionszement im mittleren Wurzeldrittel.

EO 12oo:1

Abb. 32 Zementdentingrenze. Organische Grundsubstanz des zellfreien Zementes und des Dentins. - Querschnitt einer einschichtigen Lage zellfreien Zementes und des Dentins im koronalen Wurzeldrittel.

EO 1600:1 GV 4800:1

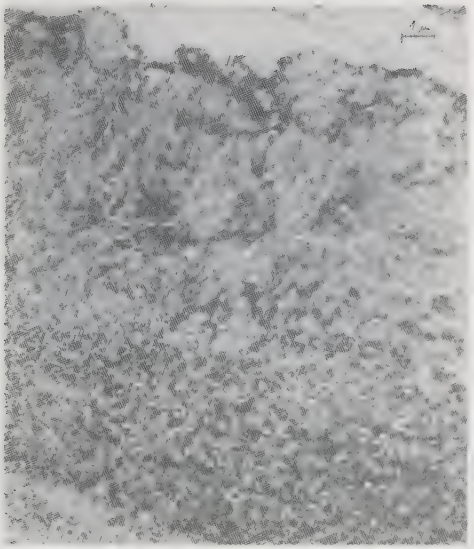

Abb. 33 **Zementdentingrenze.** Organische Grundsubstanz des zellfreien Zementes und des Dentins. - Querschnitt einer einschichtigen Lage zellfreien Zementes und des Dentins im koronalen Wurzeldrittel.

EO 1600:1 GV 6400:1

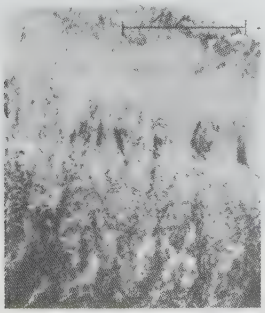

Abb. 34 Zementdentingrenze. Organische Grundsubstanz des zellfreien Zementes und des Dentins. - Querschnitt durch zellfreies Zement und Dentin im mittleren Wurzeldrittel.

EO 1200:1 GV 2400:1

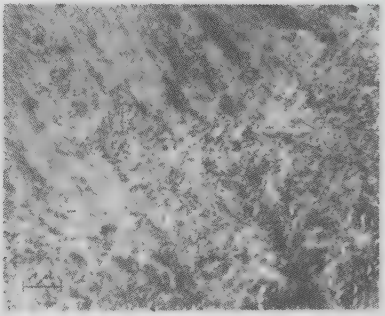

Abb. 35 Ausschnitt aus Abb.34 in höherer Vergrößerung. Zementdentingrenze. Organische Grundsubstanz des zellfreien Zementes und des Dentins.
EO 72oo:1

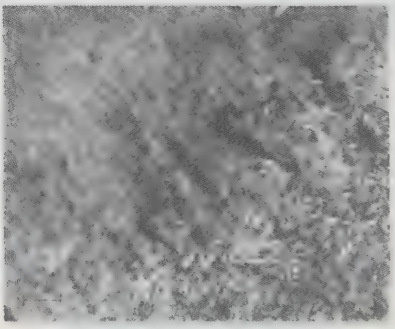

Abb. 36 Ausschnitt aus Abb.34 in höherer Vergrößerung. Zementdentingrenze. Organische Grundsubstanz des zellfreien Zementes und des Dentins.
EO 72oo:1

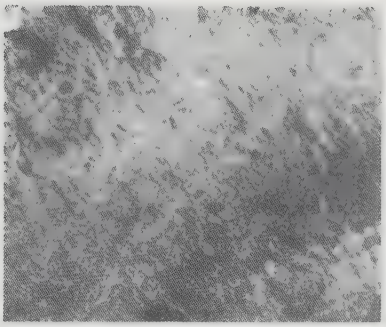

Abb. 37 Ausschnitt aus Abb.34 in höherer Vergrößerung. Organische Grundsubstanz des zellfreien Zementes.
EO 7200:1

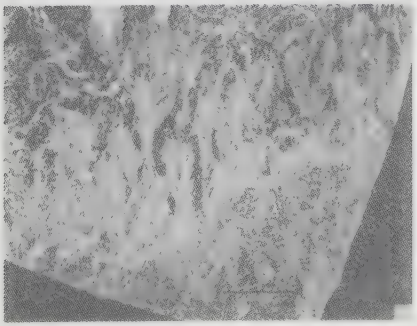

Abb. 38 Zementdentingrenze. Organische Grundsubstanz des Dentins, des zellfreien und zellhaltigen Zementes. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.
EO 1600:1

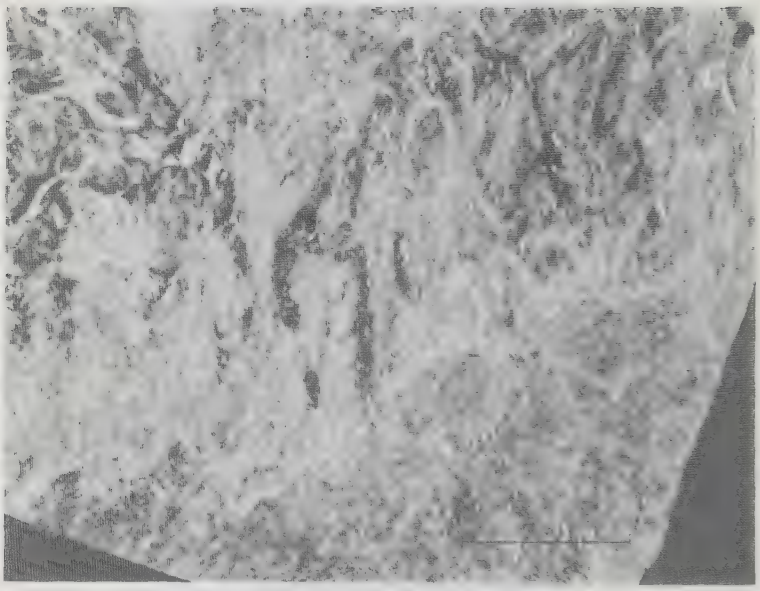

Abb. 39 Höhere Vergrößerung der Abb.38 .
EO 1600:1 GV 3200:1

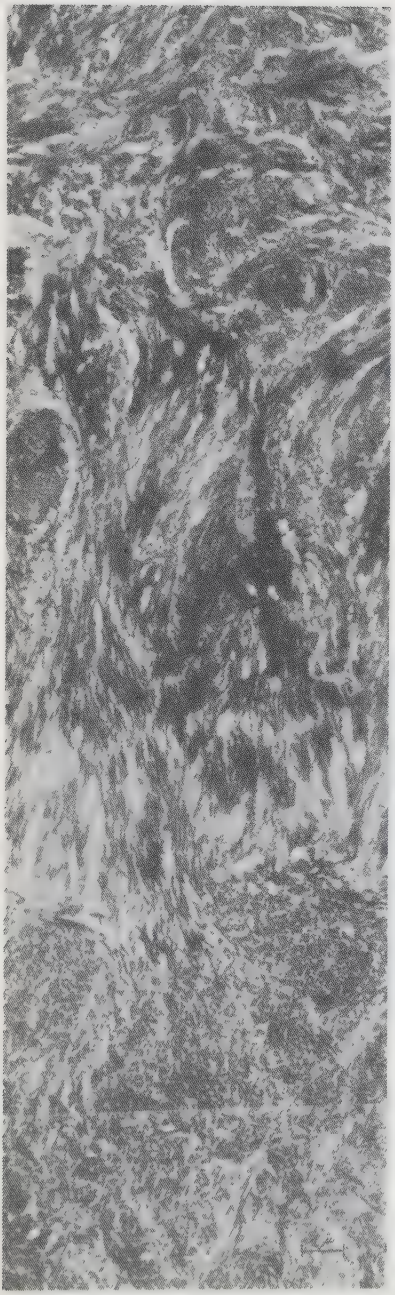

Abb. 4o Ausschnitt aus Abb.38 in höherer Vergrößerung. Zementdentin= grenze. Organische Grund= substanz des Dentins, des zellfreien und zellhaltigen Zementes.

EO 8ooo:1

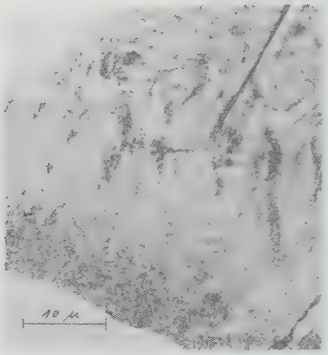

Abb. 41 Zementdentingrenze. Organische Grundsubstanz des Dentins, des zellfreien und zellhaltigen Zementes. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 1600:1

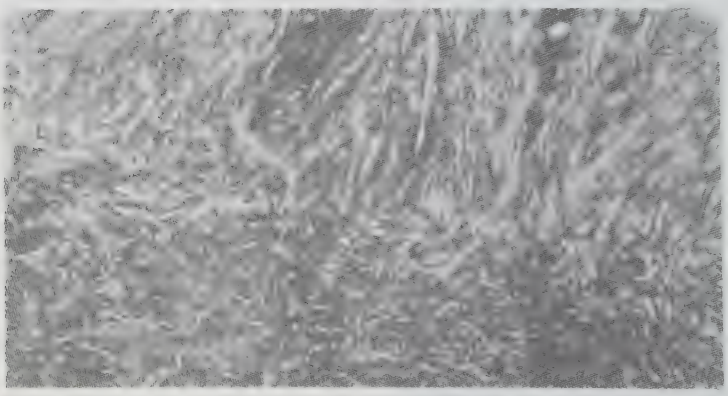

Abb. 42 Ausschnitt aus Abb.41 in höherer Vergrößerung. Zementdentingrenze. Organische Grundsubstanz des Dentins und des zellfreien Zementes.

EO 8000:1

Abb. 43 Zementoberfläche mit Teilen SHARPEYscher Fasern des Periodontiums. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 12oo:1

Abb. 44 Ausschnitt aus Abb. 43 in höherer Vergrößerung. Zementoberfläche mit einem Teil einer SHARPEYschen Faser des Periodontiums.

EO 72oo:1

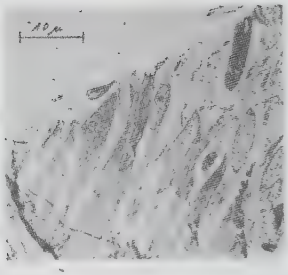

Abb. 45 Teile **SHARPEY**scher Fasern des **Perio**dontiums. Die Zementoberfläche liegt nicht mehr im Schnittbereich. Zwischen den Fasern liegen Kern- und protoplasmatische Reste von Zementoblasten. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel.

EO 12oo:1

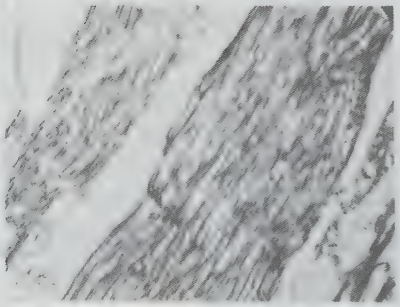

Abb. 46 Ausschnitt aus Abb.45 in höherer Vergrößerung. Teile zweier SHARPEYscher Fasern des Periodontiums.

EO 72oo:1

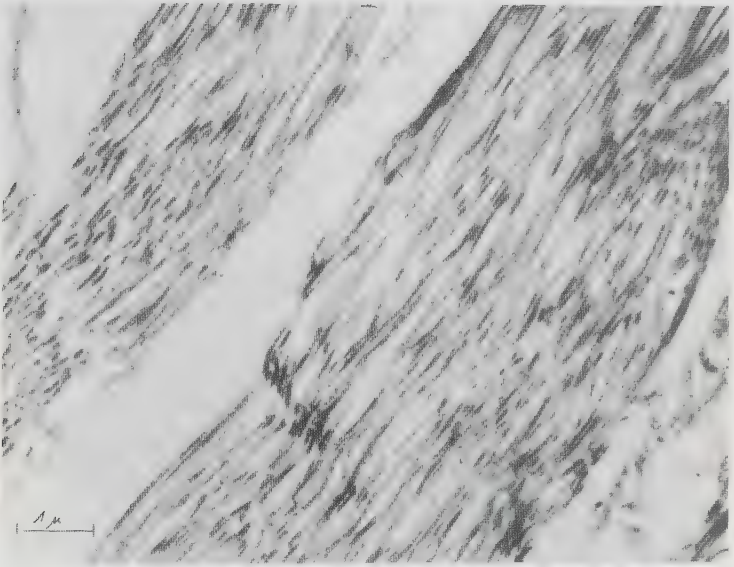

Abb. 47 Höhere Vergrößerung der Abb.46 .
EO 72oo:1 GV 144oo:1

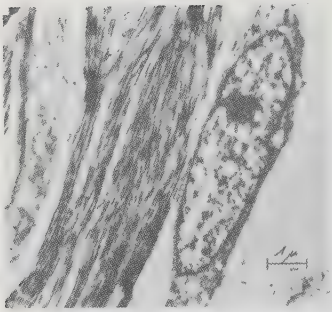

Abb. 48 Ausschnitt aus Abb.45 in höherer Vergrößerung. Teil einer SHARPEYschen Faser des Periodontiums, daneben Zellkern- und protoplasmatische Reste eines Zementoblasten.

EO 72oo:1

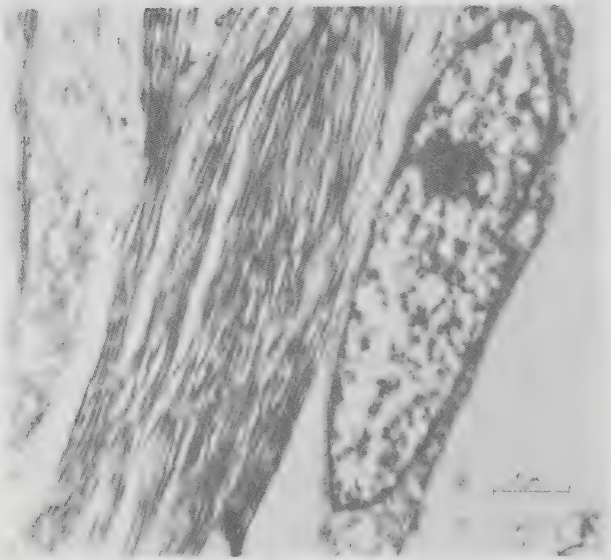

Abb. 49 Höhere Vergrößerung der Abb.48 .

EO 72oo:1 GV 144oo:1

Abb. 5o Zementoberfläche mit Teilen SHARPEYscher Fasern des Periodontiums. - Längsschnitt aus apikalem Wurzeldrittel

EO 12oo:1

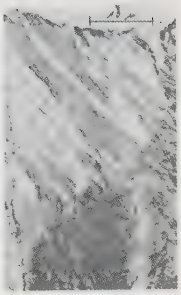

Abb. 51 Ausschnitt aus Abb.5o in höherer Vergrösserung. Teil einer SHARPEYschen Faser des Periodontiums an der Zementoberfläche.

EO 72oo:1

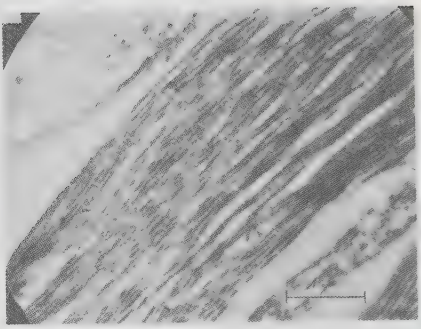

Abb. 52 Ausschnitt aus Abb.51 in höherer Vergrößerung. Teil einer SHARPEYschen Faser des Periodontiums.
EO 15ooo:1

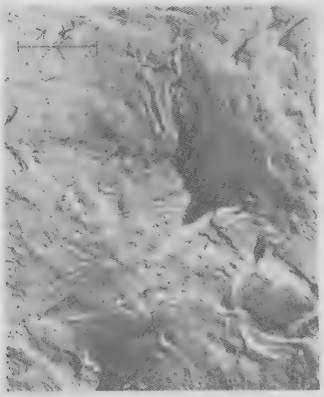

Abb. 53 Oberflächenabdruckbild eines 1o sec in 1%iger Salzsäure geätzten Zementquerschliffes.
EO 15ooo:1

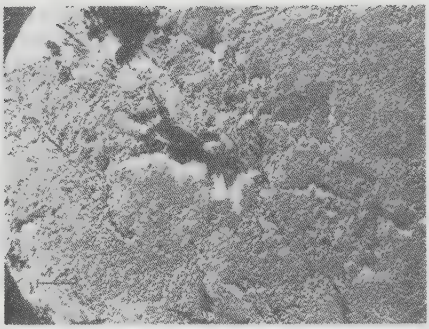

Abb. 54 Oberflächenabdruckbild eines nicht geätzten Zementquerschliffes.
EO 72oo:1

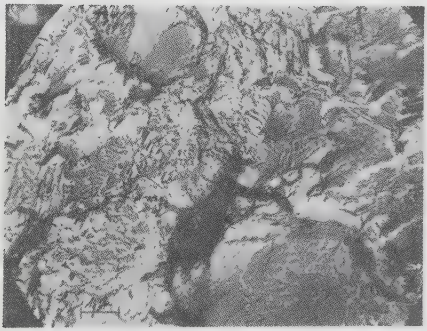

Abb. 55 Oberflächenabdruckbild eines Zementlängsbruches.
EO 72oo:1

E. Diskussion

Die elektronenmikroskopischen Ultradünnschnittuntersuchungen haben ergeben, daß sich das Zahnwurzelzement aus Gewebsbestandteilen zusammensetzt, deren Größenordnungen nicht mehr im Bereich der lichtoptisch erreichbaren Auflösung liegen und die deshalb als Einzelobjekte bei der licht- oder polarisationsmikroskopischen Untersuchung auch nicht erkannt werden konnten. Mit der Darstellung dieser Bestandteile, nämlich der quergestreiften kollagenen Zementgrundsubstanzfibrillen, konnten wir in Fortsetzung der von GEROULD (49), HELMCKE (5o) und TONGE u. BOULT (51) begonnenen elektronenmikroskopischen Untersuchung einen weiteren, direkten histologischen Beweis für die Kollagennatur des Zementgewebes liefern und die auf indirekte Weise in der licht- und polarisationsoptischen Untersuchung und der chemisch-qualitativen Analyse erhaltenen Befunde bestätigen.

Hierbei haben wir in unseren Ausführungen stets von kollagenen Fibrillen gesprochen; ob in der Zementgrundsubstanz auch unausgereifte, praekollagene quergestreifte Fibrillen vorhanden sind, wie sie W. SCHWARZ, Berlin, in eingehenden und grundlegenden Untersuchungen am Bindegewebe feststellen konnte, können wir auf Grund unserer eigenen Untersuchungen allerdings nicht entscheiden. In dieser speziellen Frage wird die Anwendung der Versilberungsmethode Aufschluß über mögliche Differenzierungsgrade geben können.

Aus der Tatsache heraus, daß diese einzelnen Fibrillen als Grundbausteine des Zementgewebes mit den Mitteln der Lichtoptik nicht sichtbar gemacht werden können, erklärt es sich, daß trotz der zahlreichen und ausführlichen mit dem Licht- und Polarisationsmikroskop vorgenommenen Untersuchungen so grundlegende Verschiedenheiten in der histologischen Beurteilung dieses Gewebes entstehen konnten, wie wir sie in der Literaturübersicht besprochen haben. Nur so ist es verständlich, daß z.B. das zellfreie Zement, die tiefen Schichten des zellhaltigen Zementes oder ganz allgemein die Zementgrundsubstanz als strukturlos oder homogen bezeichnet wurden, daß Unklarheiten über die Ausrichtung von Fibrillen und SHARPEYschen

Fasern bestehen mußten und daß insbesondere so verschiedene Auffassungen über Art und Form der Zementdentingrenze oder über die Sichtbarkeit der Verbindung der beiden Zahnhartsubstanzen besonders im mittleren und apikalen Wurzeldrittel und der vielumstrittene Begriff der intermediären Zementschicht entstehen konnten.

Die überall in der organischen Grundsubstanz befindlichen quergestreiften kollagenen Fibrillen, die wir in Ultradünnschnitten deutlich nachweisen konnten, berechtigen uns dazu, aus elektronenmikroskopischer Sicht das Zementgewebe als in seiner Gesamtheit strukturiert zu bezeichnen.

Auch die SHARPEYschen Fasern, die ebenfalls licht- oder polarisationsoptisch nicht weiter auflösbar sind, konnten wir im Elektronenmikroskop sowohl innerhalb des Zementes als auch außerhalb in Form der Periodontalfasern als Bündel quergestreifter kollagener Fibrillen und demnach als Bestandteil der organischen Grundsubstanz darstellen. Ihre Entstehung muß nach einem bestimmten, bisher noch unbekannten Prinzip erfolgen, das zur Ausbildung solcher im Querschnitt stets runder Bündel führt.

Über die Kittsubstanz, die nach der von uns angewendeten Präparations- und Untersuchungsmethode homogen erscheint, können wir keine näheren Angaben machen, weil die spezielle Untersuchung dieser Substanz über den Rahmen dieser histologischen Arbeit hinausgeht. Es wird jedoch darauf hingewiesen, daß die Schule von W. SCHWARZ, Berlin, sich eingehend damit befaßt und an anderen Bindegewebsformen eine filamentäre Anordnung der Kittsubstanz festgestellt hat. Weitere Versuche mit Hilfe der Ultraschallmethode sollen hier zur Klärung beitragen.

Während wir die kollagenen Fibrillen der organischen Grundsubstanz mit aller nur wünschenswerten Deutlichkeit an entkalktem Material direkt sichtbar machen und darstellen konnten, mußten wir uns bei der Untersuchung der anorganischen Substanz auf den qualitativen Nachweis mit Hilfe der Röntgenbeugung beschränken, da es noch nahezu unmöglich ist, Ultradünnschnitte von vollausgereiftem, mineralisiertem und nicht entkalktem Zementgewebe herzustellen. So können wir über den Ort der Einlagerung der Hydroxylapatitkristalle z. Zt. noch

keine Angaben machen. Wir weisen jedoch darauf hin, daß die Frage, ob der Hydroxylapatit in die Kittsubstanz, d.h. interfibrillär, oder auch in die Fibrillen selbst, also intrafibrillär, eingelagert wird, noch nicht entschieden ist. Hier seien z.B. die Untersuchungen von NYLEN u. SCOTT (56) erwähnt, die an Truthahnsehnen eine Einlagerung der anorganischen Substanz in die Fibrillen beobachteten. Bevor diese Probleme nicht geklärt sind, sollte in bezug auf das gesamte Zementgewebe der Ausdruck "verkalkt" ohne Bedenken gebraucht, in bezug auf die Lokalisation - in Kittsubstanz oder Fibrillen (d.h. also auch in SHARPEYschen Fasern) - jedoch nur mit großem Vorbehalt verwendet werden.

Die Darstellung von Zellen ist in der Hartsubstanzhistologie immer problematisch gewesen. Auch die Zementzellen sind aus elektronenmikroskopisch-präparationstechnischen Gründen sehr schlecht darstellbar, weil vor der eigentlichen Fixierung immer erst die Entkalkung des Gewebes vorgenommen werden muß.

Die im Elektronenmikroskop sichtbaren Unterschiede in der Grundsubstanzstruktur von Zement und Dentin lassen die Grenze zwischen beiden Geweben im gesamten Zahnwurzelbereich, d.h. also nicht nur im koronalen, sondern auch im mittleren und apikalen Wurzeldrittel deutlich erkennen. Die Befunde an der Zementdentingrenze zeigen, daß die Verbindung zwischen Zement und Dentin durch eine direkte Anlagerung der Zementgrundsubstanzfibrillen an die Grundsubstanzfibrillen des Dentins zustande kommt, ohne daß eine eigentliche, trennende Grenze resp. eine Grenzzone von besonderer Struktur vorliegt oder daß eine Membrana limitans zwischengeschaltet ist.

Nirgends konnten wir Dentinkanälchen oder Zementcanaliculi in unmittelbarer Nähe der Zementdentingrenze beobachten. Wir bestreiten zwar nicht, daß es zum Übertritt von Dentinkanälchen in das Zement und von Zementcanaliculi in das Dentin oder auch zu Verbindungen zwischen beiden Systemen kommen mag; wir können aber auf Grund unserer Beobachtungen die Feststellung treffen, daß solche Übergänge und Verbindungen keinesfalls einen regelmäßig wiederkehrenden histologischen Befund darstellen können, sondern als nur gelegentlich auftretende Gewebsvarianten bewertet werden müssen. Spezielle Untersuchun-

gen über dieses Problem sollen noch vorgenommen werden.

Betrachten wir die Zementgrundsubstanzstruktur in ihrer Gesamtheit, so können wir feststellen, daß auch im sublichtmikroskopischen Bereich Unterschiede zwischen zellfreiem und zellhaltigem Zement bestehen, die in der verschiedenartigen Ausrichtung und Anordnung der Grundsubstanzfibrillen zum Ausdruck kommen. Aus unseren Ergebnissen können wir schließen, daß bei Beginn der Zementbildung die Fibrillen zunächst radiär, d.h. senkrecht auf das Dentin aufgelagert werden und daß Richtungswechsel immer erst später, d.h. in den darauf folgenden Schichten des zellfreien oder zellhaltigen Zementes einsetzen. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang auch, daß die dem Dentin unmittelbar anliegenden Zementzonen kaum eine Tendenz zur Bündelung der Fibrillen, d.h. zur Zusammenfassung zu SHARPEYschen Fasern zeigen, während diese Tendenz in den mittleren oder peripheren Schichten des zellfreien Zementes und in allen Schichten des zellhaltigen Zementes, auch insbesondere der Appositionen und des Bifurkationsgebietes, deutlich ausgeprägt ist. Sowohl die wechselnden Vorzugsrichtungen der SHARPEYschen Fasern als auch die sich in elektronenmikroskopischen Abmessungen bewegenden Richtungswechsel der Einzelfibrillen und Fibrillengruppen sind die Folge der in Form von Druck, Entlastung oder Zug wirksam werdenden Einflüsse, denen die Zahnwurzel von der ersten Durchbruchsbewegung an bis zum Ende der Gebrauchsperiode ausgesetzt ist, wie z.B. Durchbruchsschübe, Belastung und Entlastung, Okklusionseinflüsse, Drehungen, Kippungen usf.

Die vielfältige Grundsubstanzstruktur des Zementes, wie sie sich besonders in der zellhaltigen Form sowie in den Appositions- und Bifurkationsbezirken äußert, läßt - nun auch im sublichtmikroskopischen Bereich - eine große Ähnlichkeit dieses dem Zahnhalteapparat zugehörigen Gewebes mit dem Knochen erkennen, wie ein Vergleich mit den von BAUD und WEBER-SLATKINE (52,53) sowie von ROBINSON u. WATSON (57) veröffentlichten Bildern aus elektronenmikroskopischen Untersuchungen am Knochen beweist.

Aus unseren Untersuchungen haben wir den Eindruck gewonnen, daß nur die Ultradünnschnittmethode Aufschluß über die Struk-

tur des Zementgewebes geben kann. Die Kenntnis dieser Struktur ermöglicht es erst, die Bilder, die man von Abdruckpräparaten erhält, zu deuten. Gleichzeitig liefert dieses strukturelle Erscheinungsbild die Erklärung, warum die Abdruckmethode bei der Zementuntersuchung nur zu unbefriedigenden Ergebnissen führen kann. Hierbei ist zunächst zu bedenken, daß von den drei Möglichkeiten, Abdrücke herzustellen - von unbehandelten Schliffen, von angeätzten Schliffen und von Brüchen - der Abdrucknahme von Brüchen der Vorzug zu geben ist, weil man bei Schliffen mit einer plastischen Verformung der Kristalle, bei angeätzten Schliffen mit Quellung und unterschiedlicher Freilegung der ursprünglichen Struktur zu rechnen hat. Da das Zementgewebe inotrop mineralisiert ist, kann es der Struktur dieses organischen Leitgerüstes zufolge beim Zement keine vorgebildeten Bruchstellen geben, wie sie im Schmelz durch die Prismen, im Dentin durch die Kanälchen gegeben sind. Dadurch überdeckt und verfälscht die Bruchstruktur die Eigenstruktur und erschwert deren Analyse außerordentlich. Aus diesen Gründen haben wir in der vorliegenden Arbeit zunächst von einer weiteren elektronenmikroskopischen Oberflächenabdruckuntersuchung des Zementgewebes Abstand genommen und innerhalb dieses Verfahrens auch auf eine gezielte Präparation verzichtet. In weiteren Versuchsreihen soll jedoch nach Möglichkeiten gesucht werden, auch mit der Abdruckmethode brauchbare Ergebnisse zu erzielen.

F. Zusammenfassung

Elektronenmikroskopische Untersuchungen am normalen Zahnwurzelzement wurden erstmals im Ultradünnschnittverfahren vorgenommen. Innerhalb dieser Untersuchungen wurden die Fibrillen der organischen Zementgrundsubstanz zum ersten Mal direkt sichtbar gemacht und die SHARPEYschen Fasern des Zementes und des Periodontiums erstmals elektronenmikroskopisch dargestellt. Die Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen:

1. Die organische Zementgrundsubstanz besteht aus quergestreiften kollagenen Fibrillen und aus der Kittsubstanz.
2. Die kollagenen Fibrillen können geradlinig, leicht geschwungen, wellenförmig oder stärker abgebogen verlaufen. Sie kommen als Einzelfibrillen, als Fibrillengruppen oder Fibrillenbündel vor.
3. Die Kittsubstanz erscheint im elektronenmikroskopischen Bild homogen.
4. Die anorganische Substanz konnte elektronenmikroskopisch nicht direkt dargestellt werden. Den Röntgenbeugungsuntersuchungen zufolge besteht sie aus Hydroxylapatit.
5. Die Zementlakunen sind Aussparungen der organischen Grundsubstanz.
6. Die Zementzellen sind elektronenmikroskopisch aus präparativen Gründen schlecht darstellbar. Zellkern- und protoplasmatische Reste wurden nur in den Lakunen der peripheren und z.T. mittleren Zementschichten vorgefunden.
7. Die SHARPEYschen Fasern sind Bündel parallel angeordneter quergestreifter kollagener Fibrillen.
8. Diese Fibrillenbündel haben einen runden Querschnitt und sind meist von einzelnen Fibrillen zirkulär umgeben.
9. Innerhalb des Zementes sind die SHARPEYschen Fasern Bestandteil der organischen Grundsubstanz.
10. Strukturloses Zementgewebe existiert nicht.
11. Im zellfreien Zement verlaufen die kollagenen Fibrillen vorwiegend parallel zueinander und sind zur Zementober-

fläche hin ausgerichtet. Die Formierung SHARPEYscher Fasern setzt meist erst in den mittleren und peripheren Schichten ein.

12. Im zellhaltigen Zement werden die verschiedensten Anordnungen und Richtungen der kollagenen Fibrillen und der SHARPEYschen Fasern beobachtet. Die Bildung SHARPEYscher Fasern ist stark ausgeprägt.

13. Appositionszement und Bifurkationszement sind auch in der nicht-zellhaltigen Form hinsichtlich ihrer Grundsubstanzstruktur dem zellhaltigen Zement ähnlich.

14. Im gesamten Zementgewebe können Vorzugsrichtungen der Fibrillen, Fibrillengruppen oder der SHARPEYschen Fasern im Ultradünnschnitt beobachtet werden. Die Ausrichtung der Einzelfibrillen oder der SHARPEYschen Fasern ist jedoch keineswegs ausschließlich parallel oder senkrecht zur Zementoberfläche.

15. Die Lamellenzwischenschichten zeigen eine von den anliegenden Lamellen abweichende Fibrillenrichtung.

16. Die Zementdentingrenze ist im gesamten Zahnwurzelbereich deutlich zu erkennen, da sich die Grundsubstanz des Dentins von der des Zementes grundsätzlich strukturell unterscheidet.

17. Dem Dentin liegt überall zellfreies Zement an.

18. Die Zementdentinverbindung kommt durch direkte Anlagerung der kollagenen Fibrillen der beiden Grundsubstanzformationen zustande.

19. Eine besonders strukturierte Grenzzone oder eine Membrana limitans liegen nicht vor.

20. Die Zementdentingrenze ist in elektronenmikroskopischen Abmessungen gesehen glatt oder leicht gewellt oder sie erscheint durch unregelmäßiges Vordringen von Zementgrundsubstanzfibrillen in das Dentin leicht gezackt.

21. Dentinkanälchen oder Zementcanaliculi konnten in unmittelbarer Nähe der Zementdentingrenze nicht nachgewiesen werden. Verbindungen zwischen beiden Systemen wurden nicht beobachtet.

22. Die Oberflächenabdruckmethode versagt bei der Zementuntersuchung. Die erhaltenen Bilder lassen sich aber nun nach Kenntnis der Ultradünnschnittuntersuchungsergebnisse deuten.

In der vorliegenden Arbeit haben wir versucht, die ersten Grundlagen für weitere elektronenmikroskopische Untersuchungen am Zement zu schaffen. In folgenden Untersuchungen, die vornehmlich mit Hilfe der Ultradünnschnittmethode vorgenommen werden sollen, wollen wir versuchen, weitere Aufschlüsse über die Mikromorphologie, über die Entwicklung und danach über pathologische Veränderungen dieser klinisch wichtigen Zahnhartsubstanz zu erhalten.

G. Literaturverzeichnis

Lichtmikroskopie

1) Bauer, W.:
Über traumatische Schädigungen des Zementmantels der Zähne mit einem Beitrag zur Biologie des Zementes
Dtsch.Mschr.Zahnhk. 45(17), 769-791, 1927

2) Bencze, L.:
Befunde an der Dentinzementgrenze
Österr.Zschr.Stomatol. 25, 887-896, 1927

3) Blackwood, H.J.J.:
Intermediate cementum
Brit.Dent.J. 1o2(9), 345-35o, 1957

4) Bödecker, C.F.W.:
Dentin, Cement und Schmelz
in: Heitzmann, C.: Mikroskopische Morphologie des Thierkörpers im gesunden und kranken Zustande, Kap. XVI (Die Zähne), S. 629-647, 1. Aufl. Wien, Braumüller 1883

5) Bödecker, C.F.W.:
Die Anatomie und Pathologie der Zähne
2. Ausg. Wien u. Leipzig, Braumüller 1899

6) Box, H.K.:
The dentinal-cemental junction
Canad.Dent.Res.Found.Bull.No.3, 3-25, 1922

7) Czermak, J.:
Beiträge zur mikroskopischen Anatomie der menschlichen Zähne
Zschr.wiss.Zool. 2(4), 295-322, mit 2 Tafeln XVII u. XVIII, 185o

8) Dewey, K.W.:
Normal and pathological cementum formation
Dent.Cosmos 68, 56o-585, 1926

9) v.Ebner, V.:
Cement
in: A. Köllikers Handbuch der Gewebelehre des Menschen, 6. Aufl. Bd. III Leipzig, Engelmann 19o2

1o) v.Ebner, V.:
Histologie der Zähne mit Einschluß der Histogenese
in: J. Scheffs Handbuch der Zahnheilkunde, 4. Aufl. Bd. I Wien u. Berlin, Urban & Schwarzenberg 1922

11) Egli, A.R.:
Über die Struktur des Faserzementes
Schweiz.Mschr.Zahnhk. 56(1), 23-38, 1946

12) Fürer, A.L.:
Beitrag zur Pathohistologie des Zementmantels und der Zement-Dentingrenze der Zähne
Med. Diss. Leipzig 1934

13) Gottlieb, B.:
Biology of the cementum
J.Periodont. 13(1), 13-17, 1942

14) Hattyasy, D.:
Ein Beitrag zur Struktur der Zahnwurzel
Österr.Zschr.Stomatol. 54(1o), 5o5-514, 1957

15) Held, A.-J.:
Structure microscopique de l'organe dentaire
1. Aufl. Lausanne, Roth & Cie., Paris, Masson & Cie. 1947

16) Held, A.-J.:
Cementogenesis and the normal and pathologic structure of cementum
Oral Surg., Oral Med., Oral Path. 4, 53-67, 1951

17) Jenkins, G.N.:
The physiology of the mouth
1. Aufl. Oxford, Blackwell Scientific Publications 1954

18) Ketterl, W.:
Studie über das Dentin der permanenten Zähne des Menschen
Stoma 14(2), 79-96, 1961

19) v.Korff, K.:
Zur Histologie und Histogenese der verschiedenen Zementarten, insbesondere die Beteiligung derselben am Aufbau der kompliziert zusammengesetzten Zähne
Zschr.Zellforsch.mikr.Anat. 16(3-4), 6o8-652, 1932

20) Kronfeld, R.:
Zement und Sharpeysche Fasern
Österr.Zschr.Stomatol. 26, 714-734, 1928

21) Kronfeld, R.:
The biology of cementum
J.Amer.Dent.Ass. 25, 1451-1461, 1938

22) Kühn, A.:
siehe A.L. Fürer (12), S. 9 u. 13 und P. Schmid (44), S. 328

23) Lehner, J. u. H. Plenk:
Die Zähne
in: v.Möllendorffs Handbuch der mikroskopischen Anatomie des Menschen, 1. Aufl. Bd. 5 T. III, S. 449-708, Berlin, Springer 1936

24) Meyer, W.:
Lehrbuch der normalen Histologie und Entwicklungsgeschichte der Zähne des Menschen
2. Aufl. München, Hanser 1951

25) Meyer, W.:
Anatomie
in: Port-Euler: Lehrbuch der Zahnheilkunde, 6. Aufl. München, Bergmann 1951

26) Meyer, W.:
Histologie der Zähne und des Gebisses
in: Die Zahn-, Mund- und Kiefer-Heilkunde, 1. Aufl. Bd. 1 München-Berlin, Urban & Schwarzenberg 1954

27) Müller, O.:
Pathohistologie der Zähne
1. Aufl. Basel, Schwabe & Co. 1948

28) Noyes, F.B., I. Schour and H.J. Noyes:
Oral histology and embryology
6. Aufl. Philadelphia, Lea & Febiger 1948

29) Orban, B.:
Oral histology and embryology
2. Aufl. London, Kimpton 1949

3o) Pritz, W.:

Histologie de la limite cément-dentine

deutschsprachiges Manuskript des Vortrages, gehalten am 23. April 1961 vor dem Cinquième Congrès du Groupement international pour la Recherche scientifique en Stomatologie (GIRS), Bruges, 21.-23 avril 1961 (im Druck; Bull.Group.Int.Rech.Sci.Stomatol.)

31) Scherbel, H. u. W. Schoenlank:

Leitfaden der normalen und pathologischen Histologie der Zähne

1. Aufl. Berlin, Meusser 1922

32) Shmamine, T.:

Das sekundäre Zement

Deutsche Zahnheilkunde in Vorträgen, Nr. 13, Leipzig, Thieme 19Jo

33) Skillen, W.G.:

Histological and pathological studies of the peridental membrane, cementum and dentin with reference to infections

J.Nat.Dent.Ass. 8(8), 621-631, 1921

34) Thomas, N.G.:

Formation of the apices of teeth

J.Nat.Dent.Ass. 8(1), 11-17, 1921

35) Thomas, N.G. and W.G. Skillen:

Staining the granular layer

Dent.Cosmos 62, 725-729, 192o

36) Tomes, Ch.S.:

A manual of dental anatomy, human and comparative

6. Aufl. London, Churchill 19o4

37) Walkhoff, O.:

Die normale Histologie menschlicher Zähne

2. Aufl. Leipzig, Felix 1924

38) Walkhoff, O.:

Erklärung der Tafeln und Tafeln zu Walkhoff: Die normale Histologie menschlicher Zähne

2. Aufl. Leipzig, Felix 1924

Polarisationsmikroskopie

39) Cape, A.T. and P.C. Kitchin:
Histologic phenomena of tooth tissues as observed under polarized light; with a note on the roentgen-ray spectra of enamel and dentin
J.Amer.Dent.Ass. 17, 193-227, 193o

4o) Gustafson, A.-G. and P.-A. Persson:
The relationship between the direction of sharpey's fibres and the deposition of cementum
Odontol.tskr. 65(5), 457-463, 1957

41) Keil, A.:
Grundzüge der Zahnforschung bei den Wirbeltieren und beim Menschen
Sammlung Borntraeger Bd. 16, 1. Aufl. Berlin-Zehlen=dorf, Gebr. Borntraeger 1942

42) Keil, A.:
Zement und Wurzelhaut menschlicher Zähne nach polarisationsoptischer Untersuchung
Ber.Oberhess.Ges.f.Natur- und Heilkunde,N.F.Natur=wiss.Abt. 27, 135-141, 1954

43) Nehlmeyer, C.:
Polarisationsoptische Untersuchungen über die fi=brilläre Struktur des Zementes
Gegenbaurs Morphologisches Jahrbuch 9o(4), 319-329, 1951

44) Schmid, P.:
Polarisationsmikroskopische Untersuchungen über den Faserverlauf des Zahnzementes des Menschen
Zschr.Zellforsch.mikr.Anat. 36(4), 319-332, 1951

45) Schmidt, W.J. u. A. Keil:
Die gesunden und die erkrankten Zahngewebe des Men=schen und der Wirbeltiere im Polarisationsmikroskop
1. Aufl. München, Hanser 1958

Reflexionsmikroskopie

46) Jaccard, R. et M. Grosjean:
Le cément vu en lumière réfléchie
Schweiz.Mschr.Zahnhk. 57, 613-625, 1947

47) Jaccard, R. et M. Grosjean:
Die Untersuchung von Hartgeweben (Knochen und Zähnen) in reflektiertem Licht
Dtsch.Zahnärztl.Zschr. 4(19), 1234-125o, 1949

Histochemische Untersuchungen

48) Haim, G.:
Histochemische Untersuchungen des Zementgewebes
Dtsch.Zahnärztl.Zschr. 16(2), 71-81, 1961

Elektronenmikroskopie

49) Gerould, Ch.H.:
Ultramicrostructures of the human tooth as revealed by the electron microscope
J.Dent.Res. 23, 239-245, 1944

5o) Helmcke, J.-G.:
Atlas des menschlichen Zahnes im elektronenmikroskopischen Bild, I. Teil: Histologie des normalen Zahnes
1. Aufl. Berlin-Wilmersdorf, Transmare-Photo GmbH 1953

51) Tonge, C.H. and E.H. Boult:
Collagen in human cementum as shown by electron microscopy
Nature(London) 182(4633), 459-46o, 1958

Sekundärliteratur

52) Baud, C.A.:
Observations au microscope électronique sur les canalicules du tissu osseux compact
Bull.Micr.appl. 2^{e} Série 1o(4), 45-48, 196o

53) Baud, C.A. et S. Weber-Slatkine:
Aspects microscopiques et submicroscopiques des ostéoplastes du tissu osseux compact
Bull.Micr.appl. 2^{e} Série 11(3), 73-76, 1961

54) Denton, G.B.:
The discovery of cementum
J.Dent.Res. 18(3), 239., 1939

55) Hayek, E., H. Newesely, W. Hasserteufel u. B. Krismer:
Zur Bildungsweise und Morphologie der schwerlöslichen Calciumphosphate
Mh.Chemie 91(2), 249-262, 1960

56) Nylen, M.U. and D.B. Scott:
Basic studies in calcification
J.Dent.Med. 15(2), 80-84, 1960

57) Robinson, R.A. and M.L. Watson:
Collagen-crystal relationships in bone as seen in the electron microscope
Anat.Rec. 114(3), 383-409, 1952

Literatur zur Untersuchungs- und Präparationsmethodik

58) König, H.:
Ein elektronenmikroskopisches Abdruckverfahren für biologische Objekte
Gött.Nachr.Math.Phys.Kl. 1946, S. 68-70

59) Mahl, H.:
Über das plastische Abdruckverfahren zur übermikroskopischen Untersuchung von Oberflächen
Zschr.techn.Phys. 22, 33-38, 1941

60) Mahl, H.:
Die elektronenmikroskopische Untersuchung von Oberflächen
Erg.exakt.Naturwiss. 21, 262-312, 1945

61) Neff, H.:
Grundlagen und Anwendung der Röntgen-Feinstruktur-Analyse
1. Aufl. München, Oldenbourg 1959

62) Newman, S.B., E. Borysko and M. Swerdlow:
Ultra-microtomy by a new method
J.Res.Nat.Bur.Standards 43, 183, 1949

63) Palade, G.E.:
A study of fixation for electron microscopy
J.exp.Med. 95, 285-298, 1952

64) Pfisterer, H.:
Ein Abdruckverfahren zur Abbildung rauher Oberflächen im Elektronenmikroskop
Naturwiss. 4o(3), 1o6., 1953

65) Romeis, B.:
Mikroskopische Technik
15. Aufl. München, Leibniz 1948

66) Wohlfarth-Bottermann, K.E.:
Die Kontrastierung tierischer Zellen und Gewebe im Rahmen ihrer elektronenmikroskopischen Untersuchung an ultradünnen Schnitten
Naturwiss. 44(9), 287-288, 1957

Hiermit spreche ich Herrn Professor Dr. med., Dr. med. dent. E. Harndt meinen ergebenen Dank für die freundliche Überlassung des Dissertationsthemas aus. Für seine stete Hilfsbereitschaft und für die mir erwiesene Förderung bin ich ihm herzlich dankbar.

Herrn Professor Dr. phil. habil. J.-G. Helmcke danke ich ganz besonders, daß er es mir in großzügiger Weise ermöglicht hat, in der von ihm geleiteten Forschungsstelle diese Arbeit durchzuführen. Aus seinen langjährigen elektronenmikroskopischen Erfahrungen hat er mir viele wertvolle Anregungen gegeben. Seinem wissenschaftlichen Assistenten, Herrn Dr. med. dent. H. Lenz , der mich in das Arbeitsgebiet der Elektronenmikroskopie einführte, danke ich an dieser Stelle herzlich für seinen wertvollen Rat und seine stets anregenden Hinweise.

Weiterhin danke ich Fräulein K. Rossinsky , Herrn R. Rau und Herrn B. Hartwig für ihre sorgfältige und hilfsbereite Unterweisung in der Präparations- und Mikroskopiertechnik.

Fräulein R. Listemann und Fräulein I. Willrodt schließlich danke ich für die geleistete photographische Arbeit.

Lebenslauf

Am 12. Mai 1933 wurde ich als Sohn des Textilkaufmannes und Diplom-Volkswirtes Dr. rer. pol. August Herting und seiner Ehefrau Charlotte, geb. Herpe, in Mühlhausen i. Thür. geboren. Von 1939 bis 1943 und von 1945 bis 1946 besuchte ich die Grundschule, von 1943 bis 1945 und von 1947 bis 1951 die Oberschule in Mühlhausen i. Thür. . Das Abitur legte ich am 6. Juni 1951 an der Oberschule in Mühlhausen i. Thür. ab und erlangte dessen Anerkennung außerhalb Mitteldeutschlands durch eine Ergänzungsprüfung am 23. Februar 1955 an der Sophie-Scholl-Schule in Berlin-Schöneberg. Das Studium der Zahnmedizin begann ich im Wintersemester 1954/55 an der Freien Universität Berlin, an der ich am 3. November 1959 mein Staatsexamen ablegte. Nach dem Staatsexamen befaßte ich mich als Doktorand in der Forschungsstelle für Mikromorphologie der Max-Planck-Gesellschaft mit elektronenmikroskopisch-zahnhistologischen Untersuchungen und arbeitete von Dezember 1960 bis September 1961 als wissenschaftlicher Hilfsassistent an der Zahn-, Mund- und Kieferklinik der Freien Universität Berlin. Seit dem 1. Oktober 1961 bin ich in der Forschungsstelle für Mikromorphologie im Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft als wissenschaftlicher Assistent tätig.

Photodruck der Photo Copie GmbH.